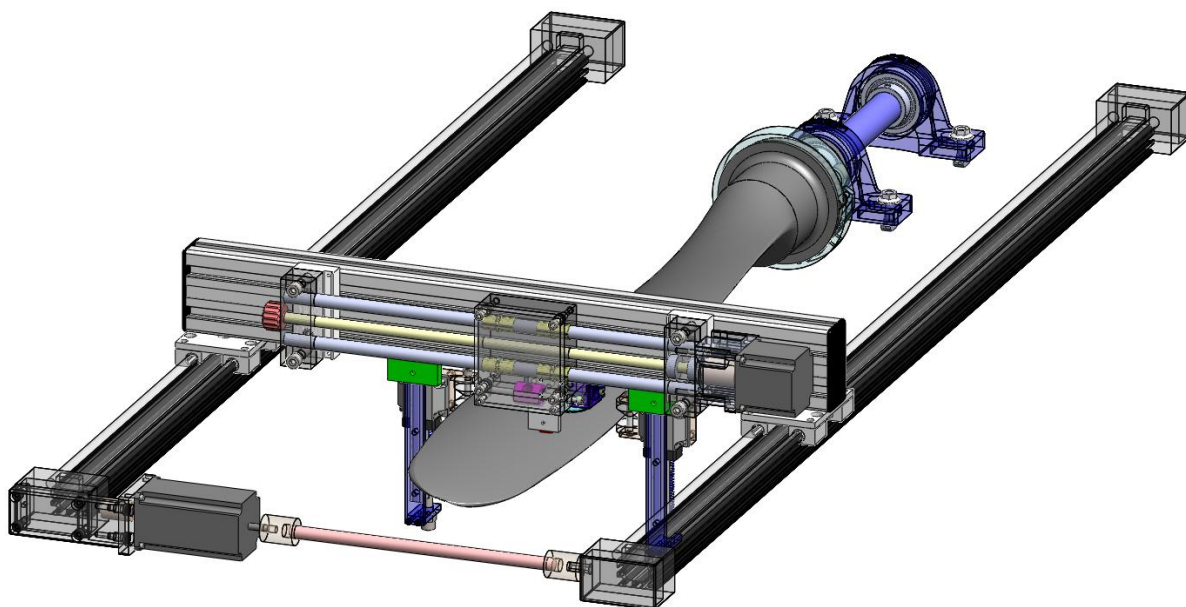


**Universidade Nova de Lisboa**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**Desenvolvimento e Aplicação de Ensaios Não  
Destrutivos para a Indústria Aeronáutica**



Francisco Demony de Carneiro Pacheco de Matos

Dissertação para obtenção do grau de mestre em  
Engenharia Mecânica

**Júri**

Presidente  
Orientador  
Vogais

Professora Doutora Rosa Maria Mendes Miranda  
Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos  
Professor Doutor Nuno Miguel Carvalho Pedrosa  
Professora Doutora Maria Luísa Coutinho Gomes de Almeida Quintino

Caparica, Julho de 2012

# **Desenvolvimento e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos para a Indústria Aeronáutica - Copyright**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Agradeço toda a dedicação dada a este estudo pelo meu orientador, Professor Telmo Santos, que ao longo destes meses me transmitiu conhecimentos na área dos ensaios não destrutivos que me permitiram realizar este trabalho.

Agradeço o imprescindível apoio prestado pelo Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães na construção do protótipo, e pelas ideias que foram essenciais para o resultado obtido com este estudo.

Agradeço ao Eng. José Pedro Sousa pela cooperação prestada neste trabalho e pela transmissão do conhecimento que adquiriu no desenvolvimento da sua tese de mestrado, também no âmbito do projecto Aeroinspect.

Agradeço ao Eng. João Gonzalez pela ajuda prestada na maquinação de alguns componentes do sistema e pela total disponibilidade demonstrada nos ensaios realizados com a sonda IOnic.

Agradeço ao Eng. Luís Rosado pela total disponibilidade demonstrada na integração da sonda IOnic no protótipo de inspecção desenvolvido.

Agradeço ao Doutor Nuno Pedrosa pela disponibilidade prestada no decorrer deste trabalho.

Agradeço ao Sr. Nuno Silva, técnico de END da empresa Aerohélice por ter sempre demonstrado disponibilidade para transmitir os seus conhecimentos e por me ter recebido várias vezes na empresa, para me dar a conhecer a realidade da inspecção e manutenção dos componentes no sector aeronáutico.

Agradeço ao Sr. António Silva por ter sempre mostrado total disponibilidade para me receber na empresa Aerohélice.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais por todo o apoio que me deram ao longo destes últimos meses, sem o qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

Agradece-se o apoio financeiro concedido pelo Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN – ADI) através do projecto “Aeroinspect”, contracto n. 11518, co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Agradece-se ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) pela colaboração prestada no desenvolvimento deste estudo.

Agradece-se também à empresa Aerohélice, Lda. por todo o apoio prestado na realização deste trabalho.

## **Resumo**

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são actualmente uma ferramenta essencial na indústria, encontrando-se bem estabelecida em todos os países industrializados. Algumas empresas nacionais têm reconhecido esta área tecnológica como fundamental no seu desenvolvimento e internacionalização.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento e a aplicação de um protótipo funcional de um sistema dedicado de END para a inspecção de componentes aeronáuticos, nomeadamente, para um hélice do fabricante Hartzell. O trabalho realizado envolveu a caracterização geométrica e mecânica dos componentes aeronáuticos seleccionados, assim como os respectivos defeitos, no que diz respeito à sua localização, dimensão e morfologia.

O sistema automatizado para a inspecção dos componentes inclui sondas de correntes induzidas dedicadas, dispositivos mecânicos automatizados para movimentação das sondas e software dedicado com interface gráfica para realizar a inspecção.

Os desenvolvimentos inserem-se no âmbito do projecto AEROInspect, financiado pelo QREN, cujo objectivo é desenvolver e implementar alternativas aos actuais métodos de END aplicados pela empresa Aerohélice, Lda na inspecção de componentes aeronáuticos. As correntes induzidas revelaram ser a técnica mais adequada, dada a reduzida dimensão dos defeitos superficiais que se pretende detectar. Os resultados preliminares revelam o elevado potencial do sistema, nomeadamente em fiabilidade e redução de tempos de inspecção.

## **Palavras-chave**

Sistema de inspecção automatizado

Ensaios Não destrutivos

Indústria Aeronáutica

Correntes Induzidas

Hélices Aeronáuticas



## **Abstract**

The non-destructive tests (NDT) are presently an essential tool in the industry and are well established in all industrialized countries. Some national enterprises have recognized this technological area as being crucial in their growth and internationalization.

This work presents the development of a functional prototype of a NDT system aimed at the inspection of aeronautic components, namely for the a Hartzell. The work included the geometric and mechanical characterization of the selected aeronautic components, as well as its respective defects, in what comes to location, dimensions and morphology.

The automatized system for component inspection includes: i) probes of dedicated eddy currents; ii) automatized mechanical devices for movement of the probes; iii) dedicated software with graphic interphase to do the inspection.

This work is performed within the project AEROInspect, financed by the Portuguese National Strategic Reference Framework for the European Funds (QREN), whose goal is to develop and implement alternatives to the present methods of NDT applied by the enterprise Aerohélice, Lda in the inspection of aeronautic components. The eddy currents proved to be the most efficient technique, given the small dimensions of superficial defaults that are supposed to be detected. The preliminary results demonstrate the high potential of the system, namely in its reliability and in the reduction in the inspection period.

## **Key Words**

Automated inspection system

Non-Destructive Testing

Aeronautic Industry

Eddy Current Testing

Aeronautic Propellers





# Índice

Desenvolvimento e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos para a Indústria Aeronáutica - Copyrighti	
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Palavras-chave .....	v
Abstract .....	vii
Key Words .....	vii
Índice .....	ix
Índice de Figuras .....	xiii
1- Introdução .....	1
1.1- Enquadramento e Objectivos .....	1
1.2 - Descrição do Problema .....	4
1.3 - Desenvolvimentos realizados .....	6
1.4 - Estrutura da Tese .....	6
2- Estado da Arte .....	9
2.1- Introdução .....	9
2.2- Caracterização do Componente – Hélice .....	10
2.3- Controlo não destrutivo aplicado na Indústria Aeronáutica .....	12
2.4- Últimos desenvolvimentos em Controlo não Destrutivo .....	13
2.5- Caracterização dos Defeitos .....	15
2.5.1 - Morfologia .....	15
2.5.2 - Dimensão .....	16
2.5.3 - Localização .....	16
2.6- Fundamentos das técnicas de Correntes Induzidas .....	16
2.8 - Fundamentos da Sonda Ionic .....	22
2.9 - Procedimentos de inspecção dos hélices aeronáuticos .....	24
2.9.2 - Procedimentos de inspecção por CI obrigatórios .....	25
2.9.3 - Procedimentos de inspecção por CI opcionais recomendados .....	27
3- Desenvolvimento de sistema automatizado de inspecção de Hélices .....	29
3.1- Introdução .....	29
3.2 - Pontos de possíveis melhorias nos END .....	30

3.3 - Melhorias a implementar na inspecção do Hélice .....	31
3.4 - Critérios de Projecto.....	32
3.5 - Protótipo #1.....	33
3.6 - Protótipo #2.....	33
3.7 - Protótipo #3.....	34
3.8 - Análise pormenorizada dos módulos do protótipo .....	35
3.8.1 - Estrutura.....	35
3.8.2 - Movimento em xx .....	38
3.8.3 - Movimento em yy .....	40
3.8.4 – Sistema Mecânico de Orientação do Hélice.....	42
4.8.5 - Suporte de Rotação do Hélice .....	46
4.9 – Controlo .....	48
4 - Construção do Sistema automatizado de inspecção .....	49
4.1- Introdução .....	49
4.2 – Construção.....	49
4.2.1 - Fixação do Hélice.....	53
4.2.2 - Roda de contacto com o hélice .....	54
4.2.3 - Peça de fixação da sonda.....	55
4.2.4 - Braços Orientadores .....	56
4.3 - Controlo do Sistema.....	62
4.4 - Integração dos Sistemas de Inspecção.....	63
4.5 - Software em Labview para controlo do protótipo .....	64
4.6 - Hélice padrão para validação do sistema.....	67
5 - Ensaios experimentais.....	71
5.1 - Introdução .....	71
5.2 - Realização dos Ensaios Não Destrutivos.....	71
5.2.1 - Precisão da Inspecção.....	72
5.2.2 - Repetibilidade da Inspecção .....	73
5.2.3 - Análise individual de defeitos .....	74
5.2.4 - Lift Off.....	75
5.2.5 - Velocidade da Inspecção .....	75
5.3 Sonda IONIC.....	76
5.4 - Análise de Resultados .....	79

5.4.1 - Precisão da Inspeção.....	79
5.4.2 - Repetibilidade da Inspeção .....	80
5.4.3 - Análise individual de defeitos .....	82
5.4.5 - Suporte para Sonda de Superfícies .....	83
Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	85
Conclusões .....	85
Propostas para desenvolvimentos futuros.....	86
Referências Bibliográficas .....	89
Anexos .....	1
1.1 - Sonda de END por CI adaptada ao bordo do hélice .....	1
1.2 -Sondas Helicoidais Cilíndricas de inspeção de superfícies.....	1
1.3 - Aparato do procedimento de inspeção por CI.....	2
1.4 - Aparelho de END por CI da Aerohélice – Nortec 2000D e Forster-Defectometer H 2.835 2	
1.5 - Inspeção do furo de equilibragem e respectiva sonda CI.....	3
1.6 - Desenhos técnicos dos componentes construídos.....	4
1.6.1 - Braço de suporte das molas verticais.....	4
1.6.2 - Calços da fixação da calha de fuso .....	5
1.6.3 - Peça de ligação dos rolamentos lineares.....	6
1.6.4 - Peça de acoplamento da roda de contacto .....	7
1.6.5 - Fixação do Hélice.....	8
1.6.6 - Fixação da Sonda .....	9
1.6.7 - Hélice.....	10
1.6.8 - Roda de Contacto .....	11
1.7 - Padrão de defeitos de furos e na superfície de um hélice padrão .....	12
1.8 - Teste dos parâmetros de inspeção por CI num padrão de defeitos.....	12
1.9 - Visualização de defeitos padrão no aparelho de END por CI Nortec 500D .....	12



# Índice de Figuras

Figura 1.1 – Representação do hélice que equipa a aeronave Hércules C-130. ....	5
Figura 2.1 – Sondas adaptadas à geometria do Hélice da Aeronave Hércules C-130. ....	11
Figura 2.2 - Representação da modelação em Solidworks 2010 do hélice: a) vista de topo; b) vista lateral (medidas em mm). ....	11
Figura 2.3 - Imagens dos reservatórios de armazenamento dos líquidos penetrantes (LP) fluorescentes, tanques de aplicação destes e a câmara escura na Aerohélice. ....	12
Figura 2.4 - Sondas multielementos: a) CI Matricial; b) US Phased-Array. ....	14
Figura 2.5 - Imagem de defeitos-padrão, realizados por electroerosão num hélice. ....	15
Figura 2.6 – Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [33]. ....	17
Figura 2.7 – Deslocamento da sonda na inspecção de uma peça e respectivo plano de impedância. ....	17
Figura 2.8 – Representação do efeito Lift-off Planar. ....	18
Figura 2.9 – Quadro representativo dos diversos tipos de sondas CI [37]. ....	19
Figura 2.10 – Sondas de CI: a) Sondas espirais planas; b) Sondas Helicoidais Cilíndricas [20]. ....	19
Figura 2.11 – Imagens dos aparelhos de CI: a) Olympus Nortec 2000D [20] b) GE USN-60 [40] ..	22
Figura 2.12 – Representação da Sonda Ionic: a) vista de baixo; b) Vista de topo; c) vista geral [33]. ....	22
Figura 2.13 – Esquemas representativos do principio fisico da sonda Ionic [33]. ....	23
Figura 2.1 – Representação da inspecção por CI do: a) furo de equilibragem; b) <i>Shank</i> . ....	26
Figura 2.2 – Sonda de inspecção do <i>Shank</i> e respectivo suporte. ....	26
Figura 2.3 – Representação da inspecção da superfície do hélice por CI recorrendo ao suporte adaptado à sonda pontual, desenvolvido pelo fabricante. ....	26
Figura 2.4 – Representação da inspecção por CI do <i>Shank</i> em V: a) vista lateral; b) vista geral. ....	27
Figura 2.5 – Representação da inspecção aos furos de ajuste da lubrificação. ....	28
Figura 3.1 – Modelação em SolidWorks do Protótipo #1: a) vista de lado; b) vista de topo. ....	33
Figura 3.2 - Modelação em SolidWorks do Protótipo 2: a) vista geral; b) vista de pormenor. ....	34
Figura 3.3 - Modelação em SolidWorks do Protótipo #3: a) vista geral; b) vista de pormenor. ....	34
Figura 3.4 – Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 da estrutura: a) vista de frente; b) vista lateral. ....	36
Figura 4.5 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 da estrutura: a) vista de frente; b) vista lateral. ....	37
Figura 3.6 – Modelação em SolidWorks do conceito 1 do movimento em xx. ....	38
Figura 3.7 - Flange MF-1040-NEMA23 [43]. ....	39
Figura 3.8 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 do movimento em yy. ....	40
Figura 3.9 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 do movimento em yy. ....	41
Figura 3.10 - Flange MF2040-Nema 23 e acoplamento do motor [43]. ....	41
Figura 3.11 - Representação gráfica da energia potencial elástica de uma mola sujeita à tracção. ....	43
Figura 3.12 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 1). ....	43
Figura 3.13 – Modelação em Solidworks 2010 do conceito 1 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente. ....	44

Figura 3.14 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente. ....	45
Figura 3.15 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 3 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente. ....	46
Figura 3.16 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 do suporte de rotação do Hélice. ....	47
Figura 3.17 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 do suporte de rotação do Hélice: a) vista isométrica de trás; b) vista isométrica de frente. ....	47
Figura 4.1 – Imagem da construção do sistema automatizado de inspecção. ....	50
Figura 4.2 – a) Acoplamento do motor responsável pelo movimento em xx; b) Peça de fixação da calha de correia. ....	50
Figura 4.3 – a) Calha de fuso; b) Braços de orientação do Hélice. ....	51
Figura 4.4 – Pormenor do braço de orientação do Hélice. ....	52
Figura 4.5 – Suporte de rotação do Hélice: a) suporte de rotação; b) peça de fixação. ....	52
Figura 4.6 – Peça de fixação do Hélice: a) vista posterior; b) vista anterior. ....	53
Figura 4.7 – Modelação em Solidworks da Roda de Contacto com o Hélice: a) versão com caixa para rolamento 635ZZ; b) versão sem caixa para rolamento. ....	55
Figura 4.8 - Modelação em Solidworks da peça de fixação da sonda: a) vista isométrica; b) vista de lado. ....	56
Figura 4.9 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 4). ....	57
Figura 4.10 - Modelação do Conceito 4 dos braços orientadores em Solidworks 2010: a) vista geral; b) vista frontal. ....	58
Figura 4.11 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 4 – variante). ....	59
Figura 4.12- Modelação em SolidWorks 2010 da variante do conceito 4 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente. ....	59
Figura 4.13 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 5). ....	60
Figura 4.14- Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 5 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente ....	61
Figura 4.15 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 5 - variante). ....	62
Figura 4.16 - Integração do sistema de inspecção de furos de Jantes com o de inspecção de hélices. ....	64
Figura 4.17 - Identificação das entradas dos módulos: a) NI 9421; b) NI 9211; c) NI 9501; d) fotografia do aparato de controlo. ....	64
Figura 4.18 - Layout do software em Labview 2011 para recepção do sinal analógico da sonda CI; b) analisar os sinais analógicos da sonda CI, com as componentes real e imaginária representadas separadamente. ....	65
Figura 4.19 - Representação do percurso realizado pela sonda CI na inspecção automática do Hélice: a) varrimento transversal; b) varrimento longitudinal. ....	66
Figura 4.20 - Representação dos defeitos padrão feitos por electro erosão (dimensões em mm). ....	68
Figura 4.21 - Representação do padrão de defeitos Olympus ( medidas da profundidade dos defeitos em mm). ....	69
Figura 5.1 - Inspecção por CI do padrão de defeitos. Defeitos do padrão Olympus: a) inspecção manual; b) inspecção automática. ....	72

Figura 5.2 - Inspeção dos defeitos de 0,25mm de largura no hélice: a) inspeção manual; b) inspeção automática. ....	72
Figura 5.3 - Inspeção dos defeitos de 0,5mm de largura no hélice: a) inspeção manual; b) inspeção automática. ....	73
Figura 5.4 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,04mm de profundidade: a) inspeção manual; b) inspeção automática. ....	73
Figura 5.5 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,5 mm de profundidade e 0,25 mm de largura: a) inspeção manual; b) inspeção automática. ....	74
Figura 5.6 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,5mm de profundidade e 0,5mm de largura: a) inspeção manual; b) inspeção automática. ....	74
Figura 5.7 - Representação gráfica da inspeção individual dos defeitos do padrão Olympus com o sistema automático. ....	75
Figura 5.8 - Representação gráfica do efeito do lift-off no sinal de CI: a) lift-off planar; b) lift-off angular. ....	75
Figura 5.9 – Inspeção automática do hélice com a sonda Ionic: a) vista geral; b) gerador de sinais da sonda; c) Marcação dos 30 ensaios realizados; d) posicionamento da sonda na inspeção. ....	77
Figura 5.10 – Representação do método de inspeção utilizado nos ensaios realizados com a sonda Ionic. ....	78
Figura 5.11 – Gráfico do C-Scan da inspeção do hélice com a sonda Ionic para uma frequência de 500 KHz. ....	78
Figura 5.12 - Representação gráfica do pormenor do dot na inspeção dos 3 defeitos do padrão Olympus: a) manual; b) automático. ....	79
Figura 5.13 - Sinal CI da inspeção contínua de 3 defeitos sucessivos nos defeitos de 0,25 mm de largura no hélice. ....	79
Figura 5.14 - Sinal CI da inspeção contínua de 3 defeitos sucessivos nos defeitos de 0,5 mm de largura no hélice. ....	80
Figura 5.15 - Representação dos gráficos obtidos nos ensaios de repetibilidade (10 vezes): a) defeito padrão 0,04 mm – inspeção manual; b) defeito padrão 0,04 mm – inspeção automática; c) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito padrão 0,04 mm; d) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito do hélice de 0,25 mm de espessura com 0,5 mm de profundidade; e) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito do hélice de 0,25 mm de espessura com 0,5 mm de profundidade. ....	81
Figura 5.16 - Gráficos da inspeção individual dos defeitos do padrão Olympus. ....	82
Figura 5.17 - Gráficos da inspeção individual dos defeitos do Hélice. ....	82
Figura 5.18 - Modelação em Solidworks 2010 do suporte da sonda de superfícies: a) vista de frente; b) vista isométrica. ....	83
Figura 5.19 – Representação do funcionamento do suporte para a sonda de superfícies projectado. ....	84





# **1- Introdução**

## **1.1- Enquadramento e Objectivos**

A indústria aeronáutica é um sector que se caracteriza por uma fiabilidade muito elevada dos seus componentes, para a qual contribuem os métodos de construção utilizados e os sistemas de manutenção e inspecção aplicados durante a sua vida útil.

A inspecção dos componentes aeronáuticos é realizada pela aplicação de métodos de Ensaios Não Destrutivos (END) ou seja, metodologias que permitem fazer uma análise dos componentes para a detecção de possíveis defeitos, sem que a sua funcionalidade seja comprometida.

Sendo o sector aeronáutico um ramo onde existe uma grande necessidade da realização de inspecções com o recurso a END, que se prende com a necessidade de assegurar que os componentes em serviço não falhem, torna-se necessário aumentar a produtividade e fiabilidade destes procedimentos. A inspecção periódica dos componentes aeronáuticos exige que as aeronaves estejam longos períodos em hangar, o que origina perdas financeiras muito grandes. As realizações das inspecções acarretam também, só por si, elevados custos que poderão ser reduzidos se os procedimentos de inspecção forem optimizados, nomeadamente através da redução da mão-obra envolvida no procedimento.

Por outro lado, sendo o sector aeronáutico muito “conservador”, por razões que se prendem com as garantias já dadas pelos métodos mais antigos, devidamente certificados, torna-se necessário um aprofundado estudo de todas as alternativas existentes, antes de explorar outras alternativas viáveis para a realização das inspecções.

Surgiram recentemente novas variantes END, as quais baseando-se nos mesmos princípios físicos das já utilizadas anteriormente, permitem trazer melhorias, nomeadamente as sondas ultrasónicas (US) *Phased-array* (PA) e as sondas de correntes induzidas (CI) multi-elemento, que inspecionam uma superfície mais alargada de material. Com o surgir destes novos processos, existe actualmente a necessidade de aproveitar todas as potencialidades que estes podem trazer para o aumento da produtividade das inspecções.

A dificuldade detectada na inspecção dos componentes pelo método de END por CI consiste no facto de o técnico se deparar com a dificuldade de garantir que toda a superfície do componente aeronáutico seja percorrida pela sonda, e em simultâneo analisar os sinais de correntes induzidas medidos. O técnico tem de garantir a perpendicularidade da sonda CI com a superfície a inspecionar e o contacto entre as duas, de modo a eliminar o efeito *lift off*. O ruído do sinal obtido pela instabilidade da sonda dificulta a detecção dos defeitos. Este facto tem um impacto negativo no tempo de inspecção, e na fiabilidade da mesma.

A aplicação de um sistema automatizado de inspecção dos componentes aeronáuticos permite garantir que toda a superfície a inspecionar seja percorrida pela sonda de CI, e que o método de inspecção seja reproduzível, pois possibilita a definição com maior precisão da movimentação que a sonda realiza sobre o material. Garante-se ainda a perpendicularidade entre a superfície a inspecionar e a sonda CI, diminuindo o efeito *lift off*, quer planar, quer angular. O técnico que realiza a inspecção fica dedicado exclusivamente à análise dos sinais das correntes induzidas obtidos. A automatização da inspecção tem ainda o potencial para o desenvolvimento de uma base de dados das inspecções, com a informação detalhada dos sinais obtidos em cada ponto da superfície inspecionada, permitindo o arquivamento para posterior consulta das mesmas.

O presente trabalho insere-se no âmbito do projecto Aeroinspect, financiado pelo QREN [1], resultado de uma parceria entre a empresa de manutenção de componentes aeronáuticos Aerohélice Lda.[2], o Instituto Soldadura e Qualidade (ISQ) [4] e o Instituto Superior Técnico (IST) [5] da Universidade Técnica de Lisboa e a Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT da Universidade Nova de Lisboa [3], enquanto instituição subcontratada. A empresa Aerohélice realiza a inspecção de componentes aeronáuticos, entre os quais se destacam os hélices e as jantes, possuindo a certificação AQAP 2110 –Allied Quality Assurance Publications [6], e respeitando as

normas ISO 9001, sendo reconhecida pela EASA – European Aviation Safety Agency [7] e INAC – Instituto Nacional de Aviação Civil [8]. A empresa realiza a manutenção para organizações tais como a NATO –North Atlantic Treaty Organization [9] e a FAP - Força Aérea Portuguesa [10].

Na área da manutenção e inspecção de componentes aeronáuticos existem muitas outras empresas a nível internacional, entre as quais se destaca a East Coast Propellers [11], a Aerospace NDI PtyLtd [12] e a Magnum Aviation [13]. Estas empresas recorrem frequentemente a inspecções manuais, sendo a inspecção automática realizada com equipamentos muito específicos, adaptados às suas necessidades concretas. Existe assim um elevado interesse no desenvolvimento de protótipos flexíveis para inspecção automatizada dos componentes que exigem inspecções mais morosas, nomeadamente jantes e hélices. No âmbito do projecto Aeroinspect e dos trabalhos de mestrado de J. Pedro [14], foi anteriormente desenvolvida uma solução para a inspecção automatizada por CI da região dos furos das jantes na aeronáutica.

Neste trabalho, por sua vez, o objectivo foi conceber, projectar, produzir e testar um protótipo funcional para a inspecção automatizada dos hélices na aeronáutica para a inspecção com END por CI, e com potencial para a aplicação de métodos de END inovadores e/ou emergentes. O dispositivo teve de cumprir os requisitos funcionais que foram fornecidos pela empresa Aerohelice, referentes aos procedimentos de inspecção e sondas actualmente certificados. Para além disso, foi definido um outro requisito técnico, que diz respeito à aplicação de métodos END emergentes que permitam a detecção de defeitos no material de dimensões inferiores aos actualmente detectáveis permitindo futuramente incrementar os níveis de fiabilidade dos componentes e consequentemente, da segurança no sector aeronáutico. Isto sem prejuízo das normas de inspecção vigentes.

Estes objectivos foram atingidos plenamente, através da implementação em ambiente pré industrial de um protótipo funcional de inspecção automatizada com capacidade para satisfazer os requisitos inicialmente definidos.

Do ponto de vista da relevância industrial e do interesse estratégico nacional, deve referir-se que o tema do presente trabalho é muito significativo, já que contribui para o aumento de competitividade de uma empresa nacional cuja actividade é caracterizada por uma forte componente de exportação de serviços. Outro indicador da importância tecnológica deste trabalho é o facto de a actual Comissão Sectorial de END existente no seio da RELACRE [15], se estar a preparar para evoluir para a Sociedade Portuguesa de END, o que traduz a dinâmica e a importância actual dos END a nível nacional. Nos últimos anos em Portugal, um grupo de investigação multidisciplinar tem adquirido competências transversais em END, garantindo hoje elevada autonomia na concepção, produção e aplicação de sistemas de END por Correntes Induzidas (CI) e Ultra-sons

(US) adaptados a diferentes especificidades industriais [16]. Os desenvolvimentos têm vindo a ser realizados por um grupo com valências nas áreas da Engenharia Mecânica e Engenharia Electrotécnica. Cooperam três instituições nacionais e uma alemã: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), Instituto Superior Técnico (IST), Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) e o Institute of Materials Research, do Helmholtz-Zentrum. Os desenvolvimentos têm incidido na concepção, projecto, produção e validação de sistemas inovadores de END. O grupo apresenta competências transversais nesta área, que incluem a criação de sondas, os meios de posicionamento e locomoção automatizada, a electrónica de geração, aquisição e processamento de sinal, e software dedicado. Esta flexibilidade permite a criação de soluções inovadoras à medida das diferentes necessidades industriais. O impacto científico dos resultados obtidos tem sido reconhecido internacionalmente em várias conferências e revistas científicas. Alguns desenvolvimentos já se encontram patenteados [17,18].

Em face do exposto, apresenta-se neste documento alguns aspectos do desenvolvimento de um caso concreto de um sistema dedicado de END. Trata-se de um protótipo funcional para a inspecção de componentes aeronáuticos, nomeadamente, para um hélice do fabricante Hartzell. O sistema visa detectar defeitos superficiais de forma automatizada, com elevada rapidez e fiabilidade. Foi testado experimentalmente o desempenho do sistema com sondas de CI convencionais (helicoidais cilíndricas), tendo-se comparado os resultados com os obtidos por uma inspecção manual padrão, método actualmente aplicado na empresa Aerohélice. Verificou-se que o novo protótipo melhora o processo de inspecção e respeita as indicações do fabricante do componente, existindo a possibilidade da sua aplicação para a realização de inspecções reais, sendo necessário que um técnico END de nível 3 ou superior o confirme. Foi ainda testada em laboratório, a aplicação da sonda *IONic Probe* optimizada na inspecção do hélice no protótipo de inspecção automatizada desenvolvido.[17, 18]

## **1.2 - Descrição do Problema**

O princípio de funcionamento dos END por correntes induzidas (CI) baseia-se no fenómeno da indução electromagnética. Os defeitos são detectados com base na variação da impedância eléctrica aos terminais de uma bobina (que constitui a sonda). Esta bobina é sujeita a uma corrente eléctrica alternada e desloca-se ao longo de um material condutor eléctrico. No caso de existir um defeito no

material a circulação das correntes induzidas é perturbada. Consequentemente, o campo magnético será menos intenso e essa alteração pode ser medida, permitindo assim detectar os defeitos.

Um dos principais problemas relacionado com a inspecção das hélices é o facto de o operador de END ter dificuldade em garantir que toda a superfície do componente é percorrida pela sonda, uma vez que este movimento manual é realizado pelo operador ao mesmo tempo que procede à análise dos sinais fornecidos pela sonda de CI. O operador tem ainda de garantir a perpendicularidade da sonda de CI com a superfície a inspeccionar, assim como o contacto permanente com a superfície, de modo a eliminar o ruído no sinal provocado pelo efeito de *lift-off* (variações da posição da sonda relativamente à superfície a inspeccionar). Este é outro problema muito crítico, porque se o defeito for de dimensão reduzida ou com morfologia de difícil detecção, este ruído no sinal devido ao *lift-off* pode ser superior à variação do sinal devido à existência de um defeito. Nestas condições o sinal do defeito é absorvido pelo ruído do *lift-off* e a sua detecção fica impossibilitada. Estes dois factores têm obviamente um impacto negativo no tempo e na fiabilidade da inspecção.

Desta análise pode derivar-se alguns critérios de projecto e requisitos do sistema de END para a inspecção das hélices: i) o sistema deve garantir a trajectória automatizada da sonda de CI, a sua correcta posição e contacto com a superfície a inspeccionar, e deve ser possível prescrever uma resolução espacial adequada; ii) A sonda de CI deve apresentar alta sensibilidade a micro-defeitos superficiais e deve ser pouco sensível ao efeito de *lift-off*.

A hélice considerada para efeitos de desenvolvimento e aplicação do sistema dedicado de END é um hélice do fabricante Hartzell. Contudo, qualquer outro modelo de hélices poderá ser inspeccionado, mediante um ajuste eventual das cotas de atravancamento do protótipo, tal como o que equipa o avião Hércules C-130, Figura 1.1.

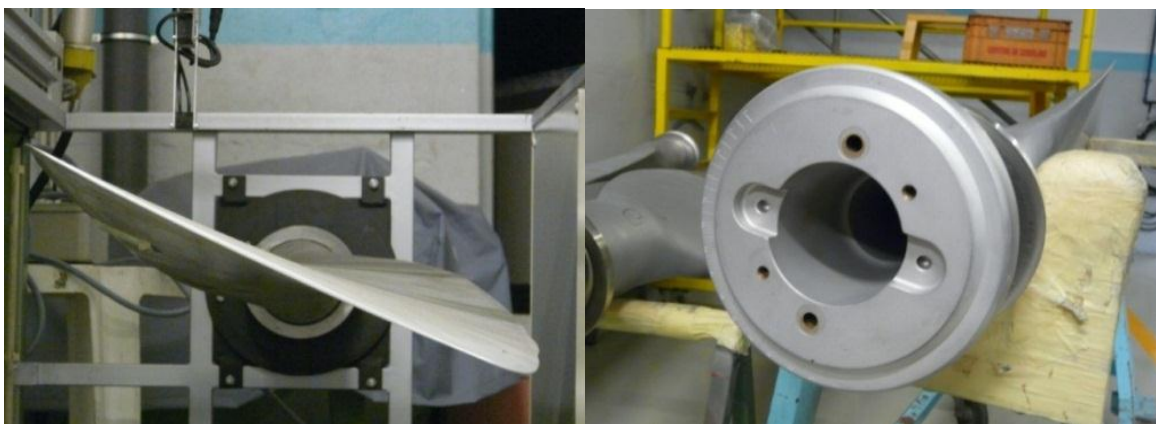


Figura 1.1 – Representação do hélice que equipa a aeronave Hércules C-130.

Os defeitos típicos que podem surgir no hélice (em toda a sua superfície, bem como no interior da cavidade cónica) têm origem em serviço, sobretudo devido a esforços de fadiga. Este fenómeno origina defeitos com morfologia do tipo fissura superficial, fina e bem definida. Por norma, procura-se detectar defeitos com aproximadamente 500 - 1000  $\mu\text{m}$ . Estes defeitos correspondem a pontos de fragilidade localizada que facilitam a propagação de fendas, e originam uma diminuição da secção resistente, podendo, no limite, conduzir ao colapso do componente.

### **1.3 - Desenvolvidos realizados**

O tipo de equipamento a inspeccionar e o tipo de sonda usada determinam os meios de posicionamento e movimentação automatizada necessários. Estes dispositivos são concebidos à medida da aplicação industrial em causa.

Na presente aplicação a automatização do mecanismo foi realizada através do controlo de motores passo-a-passo, permitindo realizar inspecções com diferentes trajectórias, velocidades, e diferentes condições de aquisição dos dados. Para o caso concreto da inspecção do hélice foi desenvolvido um chassis dedicado com movimento linear segundo os eixos X e Y e com um mecanismo para manter a perpendicularidade da superfície do hélice relativamente à sonda de CI em cada ponto de inspecção.

Foi desenvolvido um software em Labview 2011 que permite fazer o controlo dos motores de passo-a-passo, a recepção dos sinais dos fins de curso, utilizados para definir os limites do curso das guias lineares nos 2 eixos que o protótipo final possui, e para recepção dos sinais analógicos da sonda CI, e respectiva representação gráfica no Layout do mesmo.

### **1.4- Estrutura da Tese**

Este documento está estruturado em 7 capítulos, ao longo dos quais se abordam os seguintes temas:

- Capítulo 2 – Estado da Arte: neste capítulo descreve-se o estado actual da ciência e da tecnologia que tem relevância para o estudo em causa. Apresenta-se em linhas gerais, a evolução que foi obtida até à actualidade sobre o tema em estudo, e que avanços significativos têm sido realizados noutros estudos da área dos ensaios não destrutivos -

END. Descreve-se a inspecção que é realizada no sector e os métodos que são aplicados actualmente, descrição dos defeitos que se procuram detectar e do componente que será alvo do estudo (hélice), bem como uma análise aos métodos de END em geral, e em concreto às correntes induzidas – CI, procedendo-se a uma descrição dos princípios físicos que lhe estão subjacentes. São descritos os procedimentos de inspecção e manutenção aplicados aos componentes aeronáuticos em geral, particularizando para o caso do hélice, explicando-se pormenorizadamente as tarefas a que estes têm de ser submetidos na realização da inspecção *overhaul*. Incide-se ainda sobre os procedimentos de inspecção aplicados pela empresa Aerohélice, dando-se especial relevância à inspecção dos hélices, faz-se uma abordagem à certificação dos técnicos END que realizam as inspecções e às suas competências, descrevem-se as técnicas END aplicadas na empresa e referem-se os equipamentos de que esta dispõe. Faz-se ainda uma primeira análise aos tempos de inspecção praticados actualmente pela empresa na inspecção dos hélices por CI e por líquidos penetrantes – LP;

- Capítulo 3 - Sistema automatizado de inspecção de Hélices: Neste capítulo são descritas as características do processo de inspecção dos componentes aeronáuticos cujas melhorias trariam grandes vantagens sempre numa óptica de custo e fiabilidade do procedimento. A partir destes, são traçados os objectivos a que este estudo se propõe, expondo-se uma solução que permita atingi-los. São descritas as várias fases de projectação e modelação do sistema automatizado de inspecção do hélice, resultado de uma análise constante às várias soluções que foram sendo desenvolvidas, até à obtenção do protótipo final que irá ser construído;
- Capítulo 4 - Construção do Sistema automatizado de inspecção: neste capítulo descreve-se a fase de montagem e construção de todos os componentes do protótipo, dando-se especial enfoque às alterações que foram realizadas ao projecto já nesta fase, quando se concluiu que seria vantajoso para um melhor desempenho do sistema de inspecção. É ainda abordada a realização de um hélice padrão para validação do sistema;
- Capítulo 5 – Ensaios Experimentais: neste capítulo são apresentados os ensaios realizados com o protótipo desenvolvido, bem como as mesmas inspecções realizadas manualmente em condições equivalentes, para confronto dos resultados e validação do sistema automático de inspecção, e a aplicação da versão optimizada da sonda IONIC - AB4. Por fim, confrontam-se os resultados obtidos na inspecção manual dos defeitos com a inspecção realizada pelo protótipo.



- Conclusões e desenvolvimentos futuros: neste capítulo são expostas as conclusões que se retiram dos resultados deste estudo e são propostos desenvolvimentos futuros no âmbito deste projecto.

## **2- Estado da Arte**

### **2.1- Introdução**

Neste capítulo aborda-se o estado actual dos END no sector aeronáutico, particularizando para os métodos actualmente aplicados aos Hélices.

Em 2.2 faz-se a caracterização genérica dos hélices. São analisadas as suas especificidades geométricas, os materiais de que são compostos, bem como os processos de fabrico utilizados na sua produção. É ainda realizada uma descrição pormenorizada do hélice Hartzell utilizado como modelo para o desenvolvimento deste estudo.

Em 2.3 faz-se uma abordagem aos métodos END aplicados na inspecção de componentes aeronáuticos.

Em 2.4 descrevem-se alguns dos métodos emergentes aplicáveis ao sector aeronáutico, que podem trazer melhorias significativas na inspecção dos seus componentes.

Em 2.5 faz-se uma caracterização dos defeitos que se pretendem detectar, bem como uma análise da sua localização no hélice.

Em 2.6 faz-se uma caracterização do método END por CI, onde são explicados os princípios físicos que estão na base do seu funcionamento, e descritas as variantes de sondas existentes.

Em 2.7 faz-se uma descrição dos métodos de inspecção aplicados no Hélice na empresa Aerohélice, bem como uma descrição dos equipamentos utilizados.

Em 2.8 descrevem-se os princípios físicos associados à sonda IOnic.

Em 2.9 descrevem-se os procedimentos de inspecção dos hélices: referem-se as certificações dos técnicos END exigidas para a inspecção de componentes aeronáuticos; analisa-se a importância da inspecção dos componentes na aeronáutica, em particular nos hélices; descreve-se os métodos END a que estes são submetidos e posteriormente descreve-se todo o procedimento a que o hélice é sujeito para a realização dos vários tipos de inspecção, desde a sua desmontagem, à decapagem, inspecção, reparação e remontagem do componente.

## **2.2- Caracterização do Componente – Hélice**

Os hélices aeronáuticos são constituídos em geral por ligas de alumínio, tipicamente da série 7xxx, devido à sua elevada resistência mecânica, ou por materiais compósitos, ou o Kevlar e a Grafite [20]. Este estudo irá focar-se nos hélices em alumínio, uma vez que são estes que são actualmente inspeccionados na Aerohélice Lda. Estes hélices são fabricados por fundição, seguidos de forjamento [20].

O Hélice tem uma geometria helicoidal na sua pá e é constituído por uma zona de fixação ao rotor (Shank). No seu interior possui um furo que é utilizado para a calibração do momento de inércia, através da aplicação de chumbo, quando é realizada a sua montagem ao rotor (juntamente com as restantes hélices de que este é composto).

Os procedimentos de inspecção a que os componentes aeronáuticos têm de ser submetidos são determinados pelos fabricantes, e descritos nos manuais fornecidos, disponíveis por exemplo na Aircraft Manuals and Pilot Supplies [21]. Estes procedimentos podem variar de acordo com as especificidades de cada hélice, e em certos casos, existem sondas já desenvolvidas e adaptadas para a realização da inspecção de um determinado componente. Na Figura 2.1, apresentam-se algumas das sondas de CI desenvolvidas especificamente para a inspecção dos hélices da aeronave Hércules C-130 (ver também Anexo 1.1).

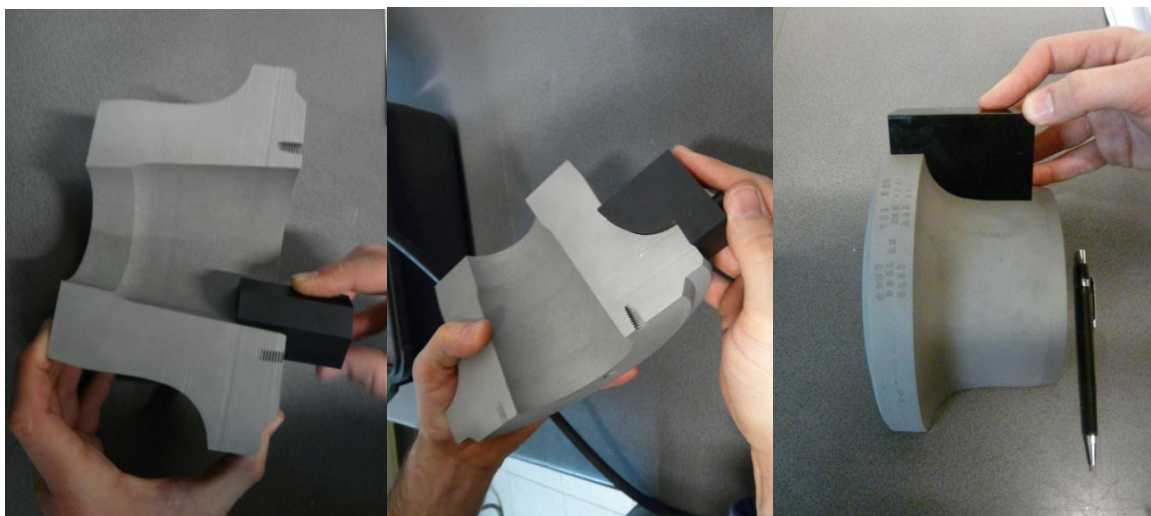


Figura 2.1 – Sondas adaptadas à geometria do Hélice da Aeronave Hércules C-130.

No âmbito deste trabalho foi considerado, como modelo, o hélice Hartzell, uma vez que as suas dimensões tornam viável a realização de um protótipo funcional de inspeção automatizado, e permitem a extrapolação dos resultados obtidos para hélices de maiores dimensões, como as que equipam o Hércules C-130. Posteriormente, poderá proceder-se ao desenvolvimento de um protótipo para a inspeção de hélices de maiores dimensões.

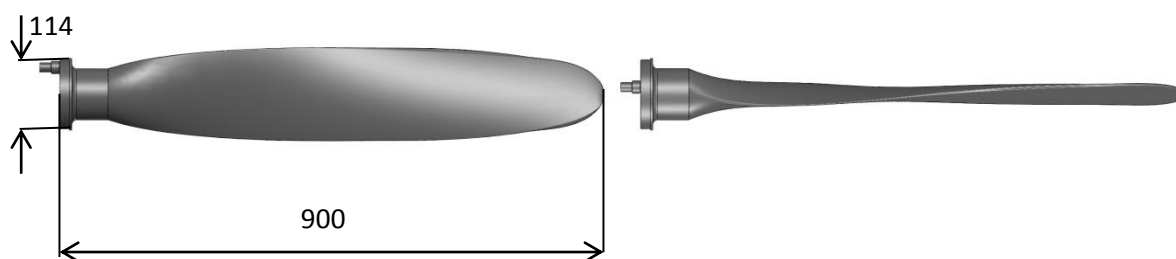


Figura 2.2 - Representação da modelação em Solidworks 2010 do hélice: a) vista de topo; b) vista lateral (medidas em mm).

O Hélice Hartzell, tem um comprimento de 900 mm, possui um diâmetro de 114 mm na zona de fixação ao rotor e um furo interno com 38 mm de diâmetro. Possui aproximadamente 7 kg.

Para se proceder a uma análise mais detalhada das características geométricas do hélice Hartzell, procedeu-se à modelação em SolidWorks 2010 deste componente, Figura 2.2.

### 2.3- Controlo não destrutivo aplicado na Indústria Aeronáutica

A inspecção dos componentes aeronáuticos é realizada pela aplicação de métodos de ensaios não destrutivos ( END) ou seja, metodologias que permitem fazer uma análise do material que compõe os componentes na detecção de possíveis defeitos, sem que a sua funcionalidade seja comprometida [8]. Os métodos END aplicados no sector aeronáutico são as Correntes Induzidas (CI), os Ultra-Sons (US), os Líquidos Penetrantes (LP - Figura 2.3), Raio-X (RX) e Partículas Magnéticas (PM).

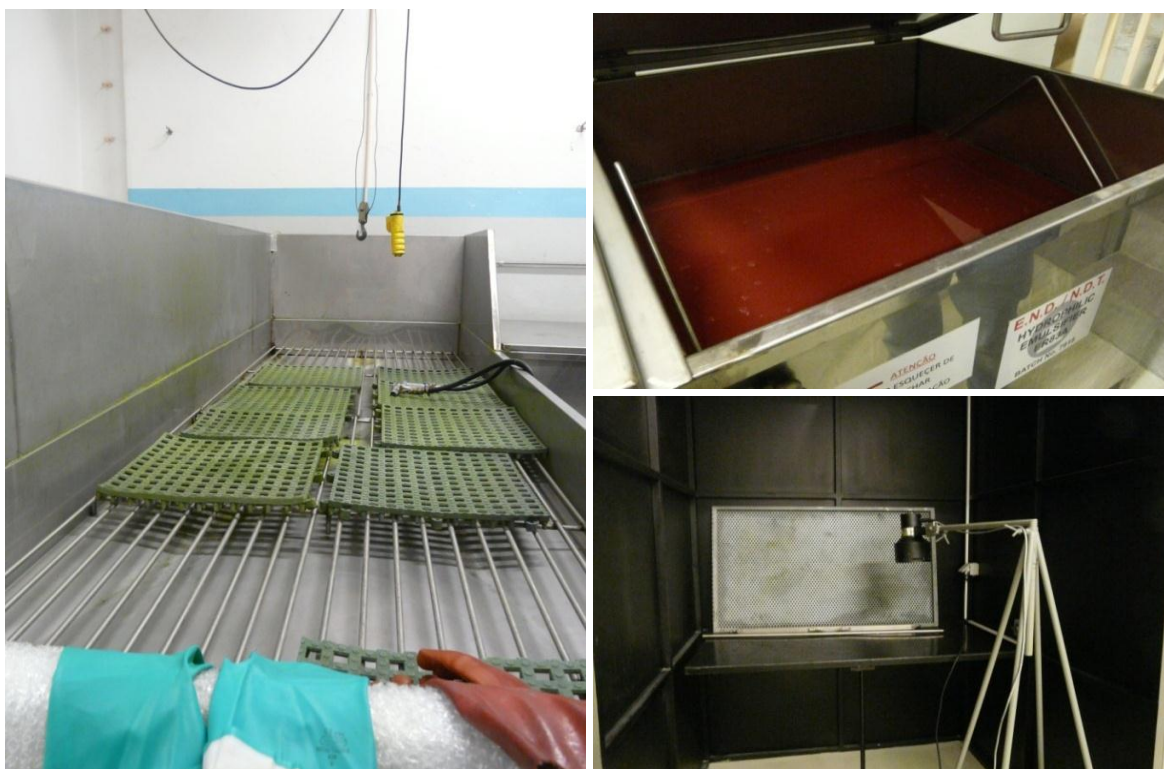


Figura 2.3 - Imagens dos reservatórios de armazenamento dos líquidos penetrantes (LP) fluorescentes, tanques de aplicação destes e a câmara escura na Aerohélice.

No sector aeronáutico, as técnicas END são aplicadas em diversas fases, para garantir a maior fiabilidade possível para os seus componentes e, conseqüentemente, níveis de segurança muito elevados [22]. Antes da fase de produção dos componentes, os materiais para a sua construção são inspeccionados por métodos END para garantir que não existem defeitos na sua estrutura, garantido que possuem as propriedades mecânicas esperadas. Durante a fase de produção, e imediatamente após esta ter sido concluída, diversos componentes são inspeccionados para garantir que se encontram em condições de serem postos em serviço, sem defeitos que comprometam o seu bom

desempenho e fiabilidade. Após o início de operação de um componente, este deve respeitar as inspecções periódicas obrigatórias que estão estipuladas no manual do fabricante, sendo que para tal devam ser respeitados tempos máximos de serviço entre inspecções gerais [20]. Os procedimentos de inspecção a seguir para os componentes aplicados na indústria aeronáutica são regulados por agências de segurança aérea, tais como a Agência Europeia para a Segurança da Aviação [22], a Federal Aviation Administration [23] e a UK Civil Aviation Authority [24].

Sendo o sector aeronáutico um ramo onde existe uma grande necessidade da realização de inspecções com o recurso a END, que se prende pela necessidade de assegurar que os componentes em serviço não falhem, torna-se necessário aumentar a produtividade destes procedimentos. Estas inspecções acarretam elevados custos, essencialmente porque exigem que os aviões não estejam em serviço durante longos períodos.

Por outro lado, sendo o sector aeronáutico extremamente conservador, por razões que se prendem pelas garantias já dadas pelos métodos mais antigos, torna-se necessário um aprofundado estudo de todas as alternativas existentes, de forma a se conhecer todas as alternativas viáveis para a realização destas inspecções.

A nível internacional existem diversas sociedades que promovem o desenvolvimento dos métodos END, nomeadamente British Institute of Non-Destructive Testing [25], The International Committee for Non Destructive Testing [26], American Society for Nondestructive Testing [27], The Chinese Society for Non-destructive Testing [28], European Federation for Non-destructive Testing - EFNDT [7], The Japanese Society for Non-destructive Inspection - JSNDI [29].

Em Portugal as principais instituições ligadas ao desenvolvimento de tecnologias de END são o Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) [4], e instituições de ensino como a Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT-UNL) [3] e o Instituto Superior Técnico [5], contribuindo nomeadamente para a criação de variantes às técnicas já existentes.

## **2.4- Últimos desenvolvimentos em Controlo não Destrutivo**

Actualmente assiste-se a um desenvolvimento cada vez maior das técnicas END, tendo surgido recentemente, novas técnicas END que, baseando-se nos mesmos princípios físicos que as suas antecessoras, tiram partido de novas tecnologias, permitindo obter vantagens deste facto,

nomeadamente em termos de eficácia de detecção de defeitos e redução do tempo dos procedimentos [30].

Nos processos por Ultra-sons (US) destaca-se a variante por *Phased Array* (PA) que, baseando-se no princípio de propagação de ondas sonoras no material, tal como as sondas por eco pulsado, integra várias sondas cuja incidência das ondas sonoras é modificada electronicamente [16].



Figura 2.4 - Sondas multielementos: a) CI Matricial; b) US Phased-Array.

Nos processos por Correntes Induzidas (CI), a sonda matricial (MAT), que também integra várias sondas, permite inspeccionar uma região numa só passagem, o que origina a redução dos tempos de inspeção, tal como a sonda *Phased Array* (PA) (embora baseado em princípios físicos diferentes e, portanto, com particularidades distintas) – Figura 2.4.

Na área dos END por Raios-X surgiu a variante digital, cuja principal vantagem é permitir uma análise em computador das áreas em inspeção, o que permite realizar o ajuste das imagens, de forma a facilitar a detecção dos defeitos (com o consequente aumento da eficácia do procedimento bem como a diminuição dos tempo de inspeção). Outra vantagem deste método é permitir a arquivagem das inspeções em ficheiro digital para posterior análise ou consulta.

Estas novas variantes das técnicas convencionais END surgem pela necessidade de cobrir a detecção de defeitos em novos materiais (compositos por exemplo), onde as características dos defeitos são muito diferentes das encontradas nos materiais convencionais, tais como micro-defeitos, delaminações, alinhamento de partículas [31]), e novas técnicas de transformação destes (como por exemplo a soldadura por fricção linear [32]).

## 2.5- Caracterização dos Defeitos

Para o estudo dos métodos de inspecção dos componentes actualmente utilizados, torna-se fundamental a realização de uma análise detalhada dos defeitos que se procuram detectar. A caracterização destes permitirá validar quais as técnicas que mais se adequam à realização da inspecção do componente.

### 2.5.1 - Morfologia

Os defeitos que surgem nos hélices têm origem em serviço, por esforços alternados de tracção – compressão, por fenómeno de fadiga. Este fenómeno origina fissuras superficiais no material, finas e bem definidas. Estes defeitos podem também ser desencadeados por uma picada de corrosão, que fragiliza o material localmente, e proporciona o surgimento de uma fissura [19].

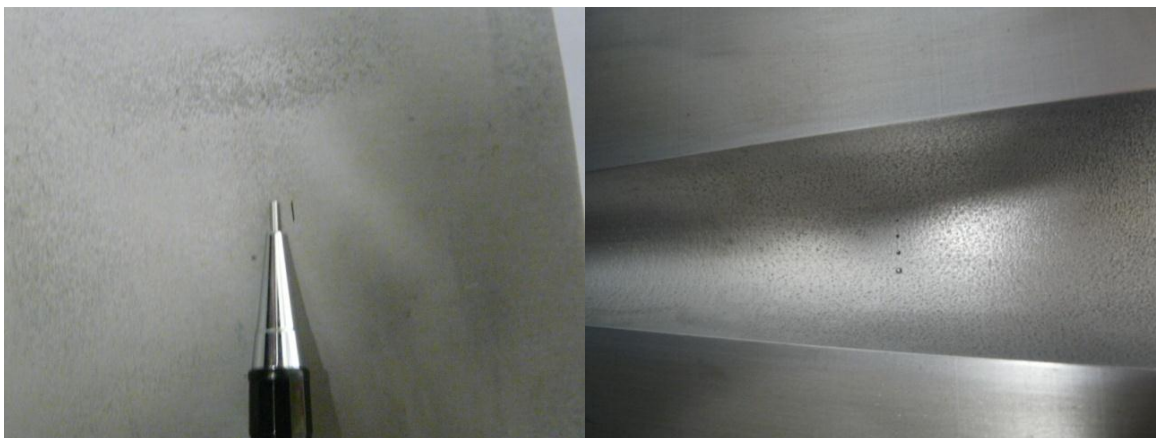


Figura 2.5 - Imagem de defeitos-padrão, realizados por electroerosão num hélice.

Este tipo de defeito tem a vantagem de ser facilmente reproduzível em laboratório, utilizando a técnica de corte por electro erosão, que permite realizar cortes de reduzidas espessuras, como ilustrado na Figura 2.5, o que será útil numa fase subsequente deste projecto, para o teste da solução desenvolvida em laboratório, e do output obtido para os defeitos-modelo que se deverão detectar (correspondentes aos menores defeitos).

Os defeitos referidos correspondem a pontos de fragilidade localizada que facilitam a propagação de fendas, e originam uma diminuição da secção resistente, podendo, no limite,



conduzir ao colapso do componente, pelo que se torna fundamental a sua detecção numa fase inicial.

### **2.5.2 – Dimensão**

Por norma, procura-se detectar defeitos na ordem de 700  $\mu\text{m}$ . Os limites que serão considerados para este trabalho estão na ordem dos 250 a 500  $\mu\text{m}$ . Segundo o manual do fabricante, as correntes induzidas – CI deverão ser aplicadas na detecção de descontinuidades no material superficiais ou subsuperficiais de profundidade igual ou inferior a 15  $\mu\text{m}$ . Por descontinuidade entenda-se qualquer fenda, corrosão ou porosidade no material condutor que é inspeccionado.

A evolução dos defeitos é tipicamente perpendicular à direcção dos esforços actuantes. Uma vez iniciados desenvolvem-se de uma forma que se pode reproduzir em laboratório durante o ensaio de fadiga.

### **2.5.3 - Localização**

Os defeitos por fadiga que se pretendem detectar são superficiais. As zonas de incidência destes defeitos estão identificadas e são referidas, para cada um dos componentes, no manual do fabricante. Os defeitos nos hélices podem surgir em toda a sua superfície, bem como no seu interior (cavidade cilíndrica).

## **2.6- Fundamentos das técnicas de Correntes Induzidas**

A sonda de Correntes Induzidas funciona com base no princípio físico da indução electromagnética. A bobina de que é composta a sonda é percorrida por uma corrente eléctrica alternada que cria um campo magnético primário  $H_p$ , como ilustrado na Figura 2.6.

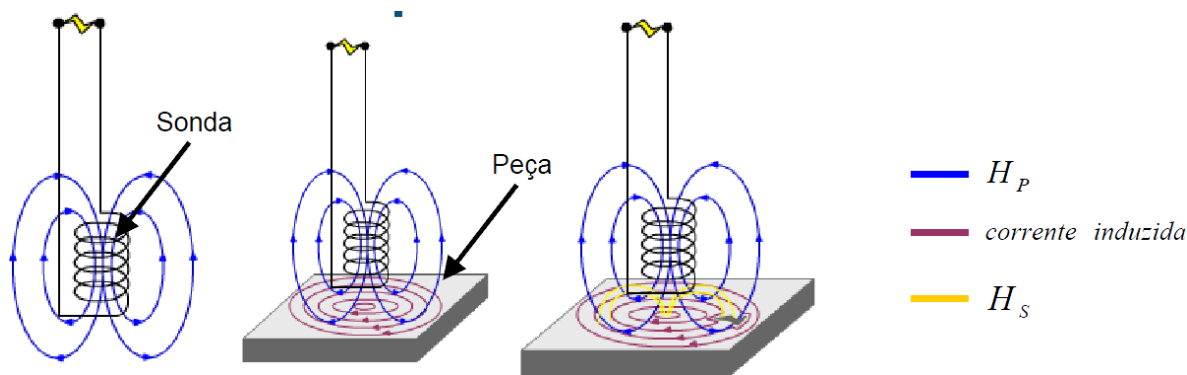


Figura 2.6 – Campos magnéticos e correntes geradas pela sonda de CI [33].

Quando a sonda é aproximada de um material condutor, o campo magnético alternado cria uma corrente eléctrica, designada por corrente induzida. A corrente induzida na peça cria um campo magnético secundário,  $H_s$ , que é sensível aos defeitos superficiais e subsuperficiais que existem no material, e irá contrariar  $H_p$ . Se existir um defeito no material,  $H_s$  é mais fraco, e consequentemente o valor da impedância eléctrica medida aos terminais da sonda aumenta, permitindo a detecção deste no plano de impedância, Figura 2.7.

A medição desta variação, permite ainda executar várias acções de controlo, nomeadamente a medição da condutividade eléctrica, medição de permeabilidade magnética, variações dimensionais (e.g. perdas de espessuras), identificação do material e medição de espessuras [34] [35, 36].

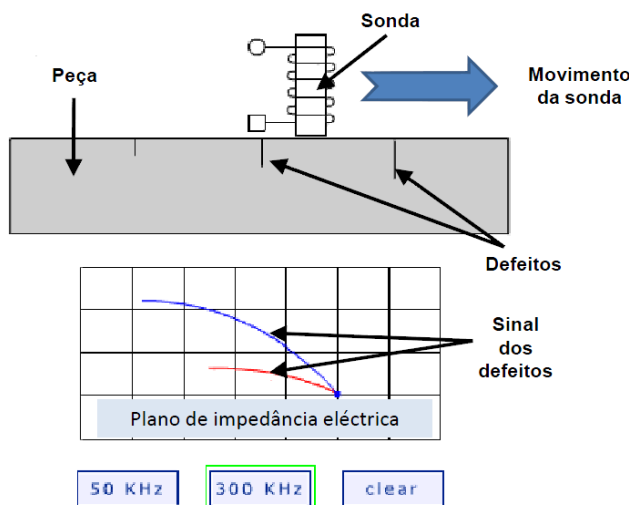


Figura 2.7 – Deslocamento da sonda na inspeção de uma peça e respectivo plano de impedância [37].

Na aplicação das sondas CI, é necessário garantir um contacto com o material e a sua perpendicularidade para evitar a ocorrência de *lift off* planar e angular, como representado na Figura 2.8. Quando se verifica um destes fenómenos, o valor obtido no plano de impedâncias é distorcido e adquire um nível de ruído que impede a identificação dos defeitos.

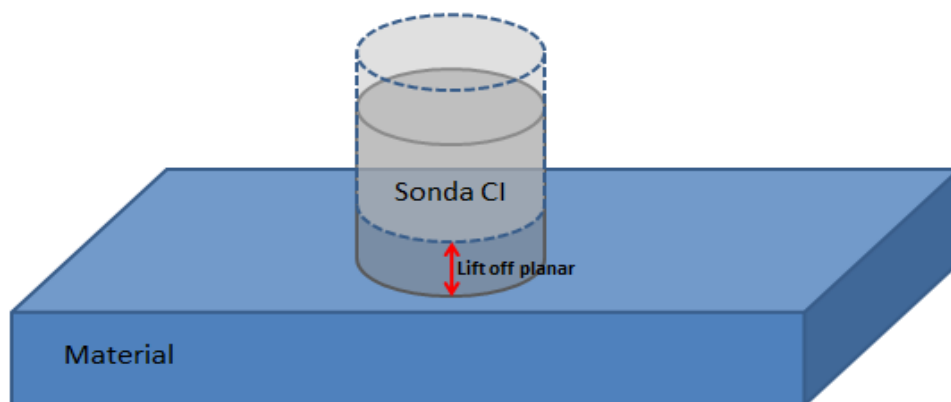


Figura 2.8 – Representação do efeito Lift-off Planar.

Existem diversos tipos de sondas CI, de acordo com a aplicação a que se destinam, Figura 2.9.

Relativamente ao modo de funcionamento, existem dois tipos, sondas absolutas e diferenciais. As sondas absolutas são constituídas por apenas uma bobine que é simultaneamente a sonda de excitação e de recepção. O valor analisado no plano de impedâncias é a impedância total da bobine. A sonda diferencial é composta por duas bobines, e o valor analisado no plano de impedâncias é a diferença de impedância entre as duas bobines.

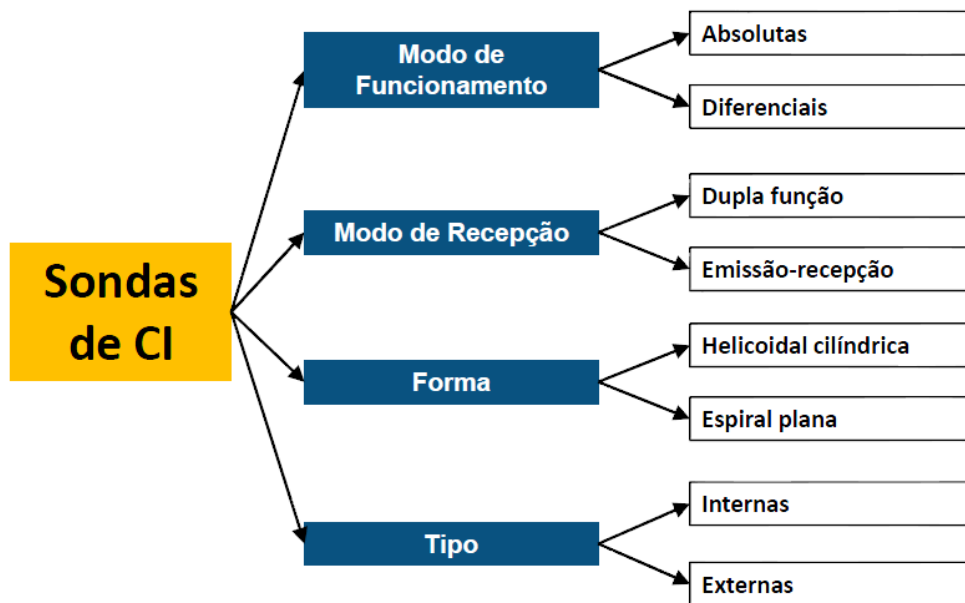


Figura 2.9 – Quadro representativo dos diversos tipos de sondas CI [37].

Relativamente ao modo de recepção existem dois tipos, sondas de dupla função e de emissão – recepção. As sondas de dupla função são constituídas por apenas uma sonda que simultaneamente introduz as correntes induzidas e detecta as alterações na sua circulação. As sondas de emissão – recepção são constituídas por uma bobine responsável pela introdução das correntes induzidas e uma sonda responsável pela recepção das suas alterações.



Figura 2.10 – Sondas de CI: a) Sondas espirais planas; b) Sondas Helicoidais Cilíndricas [20].

Quanto ao formato existem dois tipos, as sondas helicoidais cilíndricas, geralmente designadas de sondas pontuais, permitindo a inspecção de pequenas regiões do material com boa

resolução e as de espiral plana, que permitem inspeccionar maiores áreas, com menor resolução na detecção dos defeitos,

Figura 2.10.

As sondas utilizadas na realização de inspecção END por CI nos hélices na Aerohélice são pontuais, do tipo absoluto de dupla função (Anexo 1.2).

O método END CI é um método que é muito aplicado na inspecção dos componentes aeronáuticos. A sua aplicação é vantajosa em várias condições de inspecção, face às alternativas actualmente existentes, pois possui diversas vantagens, nomeadamente [38]:

- A inspecção não exige a preparação prévia do componente, uma vez que o campo magnético criado pela sonda apenas é afectado por materiais electromagnéticos (não exigindo a decapagem da tinta por exemplo);
- A sonda possui elevada sensibilidade na detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais;
- Os equipamentos são de pequenas dimensões e geralmente portáteis, permitindo realizar a inspecção em qualquer local;
- O resultado da inspecção é obtido instantaneamente;
- A sonda é adaptável a uma grande variedade de geometrias;
- A sensibilidade da sonda às características físicas e metalúrgicas do material permite, através da variação dos parâmetros de inspecção, ajustar o seu desempenho a diferentes tipos de inspecção;
- O contacto entre a sonda e o material é assegurado por um campo magnético, pelo que não existe o risco de dano no componente.

Por outro lado, existem algumas limitações associadas ao método END CI que importa referir [38]:

- Exige uma elevada perícia do técnico de inspecção, estando dependente da interpretação que este faz do sinal obtido;
- O efeito *Lift off* é prejudicial, uma vez que se pode confundir com a detecção de um defeito, adicionando uma variável de distorção do sinal;
- Apenas pode ser aplicado a materiais condutores de corrente eléctrica;
- Não originam o registo da inspecção realizada, ao contrário de outros métodos como o RX, no qual se obtém uma película, que serve de prova à inspecção realizada;
- A profundidade da inspecção, apesar de incrementada a frequências mais baixas, é limitada [27].

## **2.7-Aplicação das técnicas END nos Hélices na Aerohélice**

Na inspecção de componentes através de métodos END, existem várias variáveis que condicionam a escolha do método a utilizar. As principais condicionantes envolvidas são as características do material a inspecionar, nomeadamente relativamente às suas propriedades electromagnéticas, a geometria da área a inspecionar, que pode condicionar o acesso do método a aplicar ou o seu desempenho. As características dos defeitos são outra das grandes condicionantes na escolha do método END a aplicar. Deve ter-se em conta a sua morfologia, a sua dimensão e a sua localização preferencial. Por exemplo, na detecção de defeitos subsuperficiais é inútil a aplicação de LP, uma vez que o resultado da inspecção não trará nenhum indício. Sendo assim, é importante a escolha adequada dos métodos a aplicar para a detecção dos defeitos que poderão surgir no material.

A inspecção de um componente aplicado na indústria aeronáutica caracteriza-se por longos tempos de inspecção [39]. No caso dos hélices, os métodos END actualmente utilizados são os LP, e as CI. Relativamente aos LP, o procedimento de inspecção exige que se proceda à imersão do componente no líquido penetrante durante um período mínimo de 15 minutos, e a posterior revelação durante um período de 20 minutos. Após este procedimento, o componente tem de ser inspecionado visualmente pelo técnico, não sendo possível substituir este procedimento manual pela sua automatização. Na aplicação de métodos END por CI o técnico tem de garantir que toda a superfície a inspecionar é percorrida pela sonda CI. No processo de inspecção, o técnico analisa em tempo real o valor da impedância medido pela sonda no material do componente.

A empresa Aerohélice aplica actualmente uma sonda pontual Olympus de superfícies, com um aparelho de correntes induzidas Nortec 2000D. O procedimento de inspecção por CI é um processo demorado, sendo a duração média da inspecção do hélice Hartzell em análise, de aproximadamente 60 minutos (Anexo 1.3).

Os equipamentos utilizados para realizar o processo de inspecção por Correntes Induzidas (CI), na Aerohélice, são o Olympus Nortec 2000D e o GE USN-60 (Figura 2.11 e Anexo 1.4). As inspecções são realizadas tipicamente com uma frequência de 200 kHz [19].

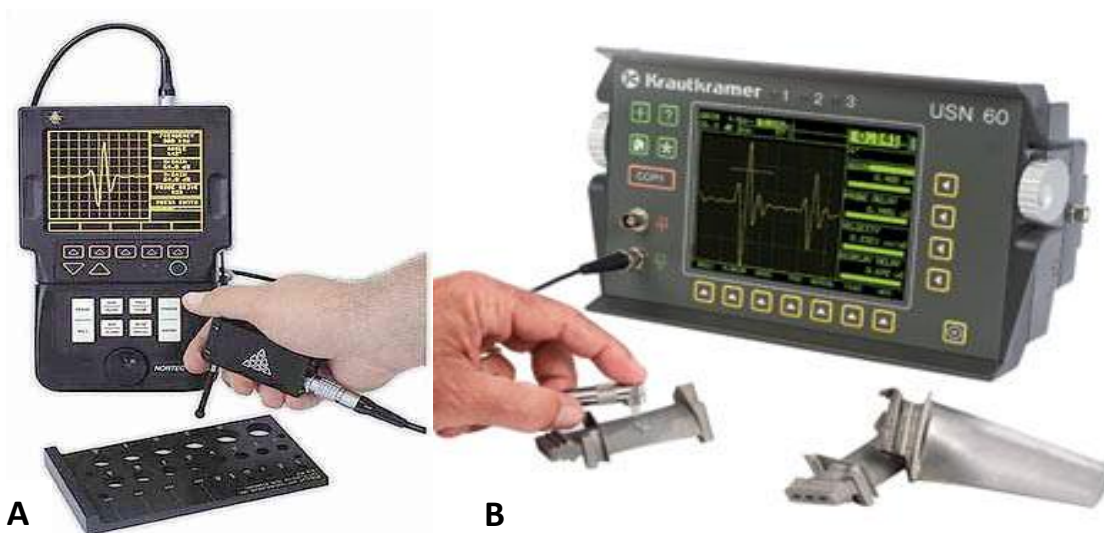


Figura 2.11 – Imagens dos aparelhos de CI: a) Olympus Nortec 2000D [20] b) GE USN-60 [40]

## 2.8 - Fundamentos da Sonda Ionic

A sonda Ionic é resultado de um estudo que pretende otimizar a detecção dos defeitos por END por CI, nomeadamente na Soldadura por Fricção Linear (SFL). Esta sonda, baseando-se nos mesmos princípios físicos já conhecidos, possui uma estrutura que lhe confere um comportamento particular, permitindo a detecção de defeitos menores, podendo abranger áreas de inspecção maiores do que uma sonda de superfícies convencional.

Esta sonda inovadora tem como principais componentes um filamento de excitação e duas bobinas sensíveis. A sonda é constituída por 5 elementos (Figura 2.12): bobina de excitação toroidal (1); bobina sensível espiral plana (2); suporte das bobinas (3); suporte da bobina de excitação (4); terminais das bobinas sensíveis (5).

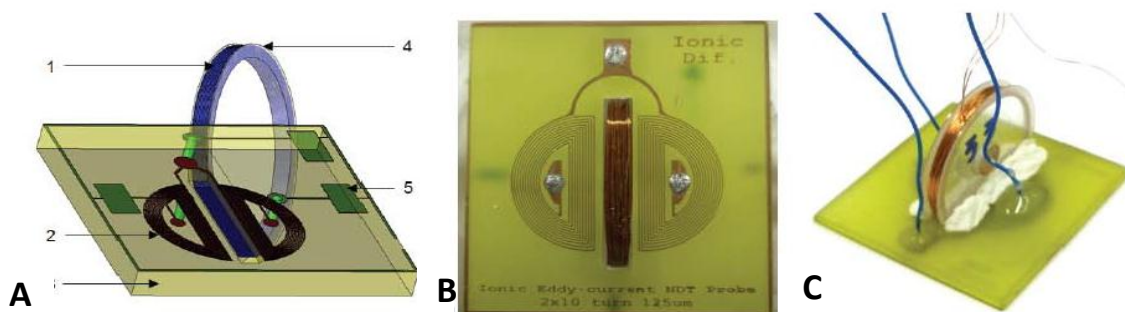


Figura 2.12 – Representação da Sonda Ionic: a) vista de baixo; b) Vista de topo; c) vista geral [33].

O filamento de excitação toroidal da bobina (1), pode ser excitado com uma corrente eléctrica alternada, com uma forma de onda tipicamente sinusoidal, podendo também ser utilizadas ondas triangulares ou quadradas. As frequências de funcionamento utilizadas são idênticas às frequências utilizadas nas sondas de CI convencionais, ou seja, entre os 5 kHz a os 5 MHz.

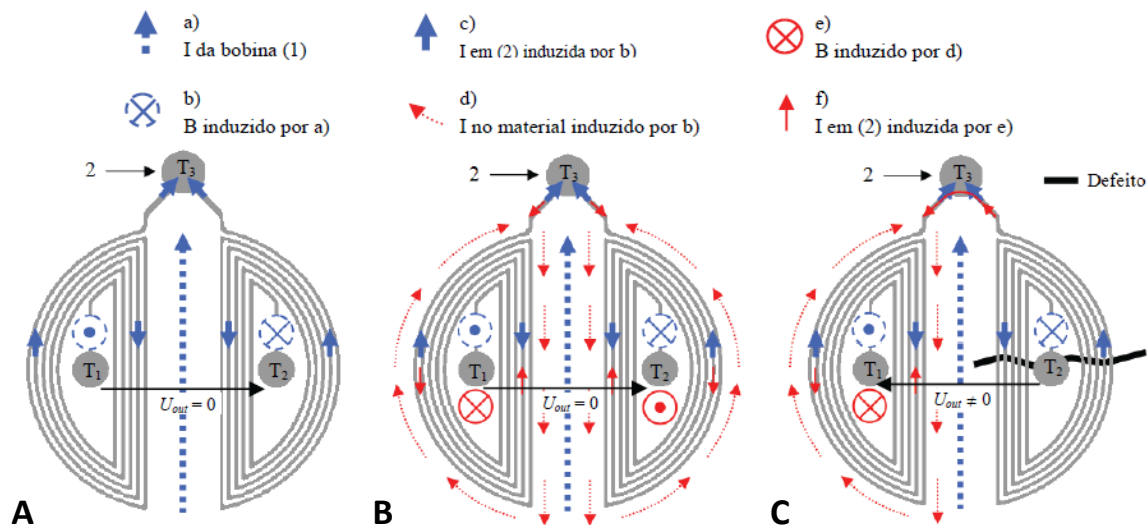


Figura 2.13 – Esquemas representativos do princípio físico da sonda Ionic [33].

Relativamente ao funcionamento da sonda, existem três situações (ver detalhes em [33]): i) Primeira situação: sonda no ar ou lift-off infinito (Figura 2.13 – a)): a bobina de excitação toroidal (1) ao ser percorrida por uma corrente eléctrica sinusoidal a) induz um campo magnético b), que por sua vez induz uma corrente c) na bobina sensível espiral plana (2). O traçado especial da bobina sensível espiral plana (2), com duas semicircunferências espirais de sentidos opostos, faz com que o fluxo do campo magnético b) tenha duas contribuições opostas para a corrente global induzida nesta espiral, o que resulta numa corrente global nula e consequentemente um  $U_{out}$  também nulo aos terminais T1 e T2 da bobina sensível espiral plana (2). Estas três grandezas eléctricas (corrente a), campo magnético b) e corrente c)), características da primeira situação de funcionamento, mantêm-se presentes e inalteradas nas outras duas situações de funcionamento.

ii) Segunda situação: sonda no material livre de defeitos (Figura 2.13 – b)): quando a sonda se aproxima de um material homogéneo livre de defeitos, para além das três grandezas eléctricas da primeira situação (Figura 2.28 a), aparece também no material homogéneo um campo de corrente eléctrica d), com a forma aproximada de duas semicircunferências, que é induzida pelo campo magnético b) de acordo com a lei geral da indução. Esta corrente eléctrica d) induz um campo



magnético e), que por sua vez induz uma corrente f) na bobina sensível espiral plana (2). Se o material for homogêneo, a corrente global induzida na bobina sensível espiral plana (2) será nula, assim como a tensão eléctrica induzida  $U_{out}$  aos terminais T1 e T2, pelas mesmas razões descritas na primeira situação de funcionamento. Este equilíbrio de correntes mantém-se independentemente da distância da sonda ao material a inspeccionar (lift-off).

iii) Terceira situação: sonda no material com defeitos (Figura 2.13 – c)): relativamente à situação anterior, a existência de um defeito sob uma das semicircunferências cria uma perturbação à circulação da corrente induzida d) o que introduz um desequilíbrio na corrente induzida f), que se traduz pelo aparecimento de  $U_{out}$  diferente de zero aos terminais T1 e T2 da bobina sensível espiral plana (2). É com base nesta tensão eléctrica induzida  $U_{out}$  diferente de zero que se avalia a existência de defeitos.

## **2.9 - Procedimentos de inspecção dos hélices aeronáuticos**

Os hélices Hartzell devem ser submetidos a inspecção através da aplicação dos métodos END por CI e LP, realizados por técnicos certificados. Os hélices devem ser sujeitos a inspecção obrigatória de acordo com o tempo de serviço entre inspecções, denominadas overhaul [19]. Nestas inspecções, os hélices são desmontados do rotor e a tinta que os reveste é removida através da aplicação de partículas de plástico à pressão [19]. Desta forma, o componente está preparado para ser submetido à inspecção por LP, o que não seria possível com o revestimento.

### **2.9.1 – Certificação da Manutenção de Componentes Aeronáuticos**

A manutenção dos componentes aeronáuticos é realizada por um técnico certificado de END, que está habilitado a realizar a inspecção, sendo que existem 3 níveis diferentes de certificação [41]. As competências dos técnicos END estão reguladas pelo documento ISO 9712, criado em 1992, que foi adoptado por mais de 40 países em todo o mundo. Tem como objectivo, uniformizar a certificação dos técnicos END, sendo a sua elaboração e revisões (em 1999 e 2005) realizadas por um grupo de técnicos altamente especializados. Com base nesta norma ISO, foi redigida a norma europeia, EN 473:1993, cuja elaboração foi da responsabilidade do comité CEN/TC 138, pertencente ao European Committee for Standardization, composto por especialistas da área dos END. A norma europeia foi revista 3 vezes, sendo que a última, EN 473:2008, não se baseou na norma ISO 9712:2005, mas numa revisão da anterior norma EN

473:1999, criando uma divergência entre os dois documentos. De acordo com este documento o técnico de END de nível 1 está habilitado a realizar a inspecção dos componentes aeronáuticos, podendo apenas realizar calibrações específicas, e limitado aos parâmetros de inspecção e às técnicas escolhidas por um técnico END de nível superior (nível 2 ou 3). O técnico END de nível 2 é em geral um engenheiro ou um técnico com alguma experiência na área dos END, e está qualificado a realizar a calibração dos métodos, conduzir uma inspecção de acordo com normas e directrizes, descritas nos manuais dos fabricantes, orientar a inspecção de técnicos de nível 1, escolhendo os métodos que mais se adequam ao componente a inspecionar, e interpretar, avaliar e reportar a detecção de defeitos. Os técnicos de nível 2 estão ainda habilitados a supervisionar e formar técnicos de nível 2, e devem ter um conhecimento aprofundado dos processos de fabrico e do desempenho dos componentes em serviço.

O técnico de nível 3, é geralmente um engenheiro especializado ou um técnico com grande experiência na área, e corresponde ao nível mais elevado de qualificação de um técnico END, e está habilitado a estabelecer novas técnicas de inspecção END, a dirigir laboratórios e oficinas de manutenção, tendo um papel central na formação e certificação dos técnicos. Devem ter um conhecimento muito aprofundado dos materiais que compõem os componentes, dos processos de fabrico associados, e das tecnologias associadas aos mesmos.

## **2.9.2 - Procedimentos de inspecção por CI obrigatórios**

Segundo o manual do fabricante, que determina os procedimentos que deverão ser realizados na inspecção dos componentes, numa manutenção *overhaul* o hélice deve ser submetido a inspecção por correntes induzidas nas seguintes partes [19]:

- O furo de equilibragem de todos os hélices em alumínio (Figura 2.14 e Anexo 1.5);
- A superfície de todos os T-*shank* dos hélices em liga;
- O raio de retenção de todos os X e V *shank* dos hélices - Figura 2.15;
- No Y *shank* de hélices compactos, o furo de ajuste da lubrificação em hélices de produção anterior a 1983.

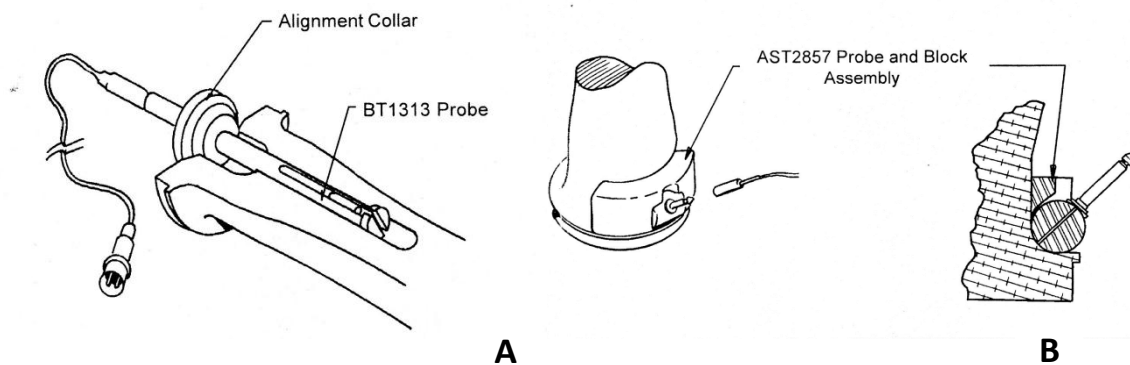


Figura 2.14 – Representação da inspeção por CI do: a) furo de equilibragem; b) *Shank*.



Figura 2.15 – Sonda de inspeção do *Shank* e respectivo suporte.

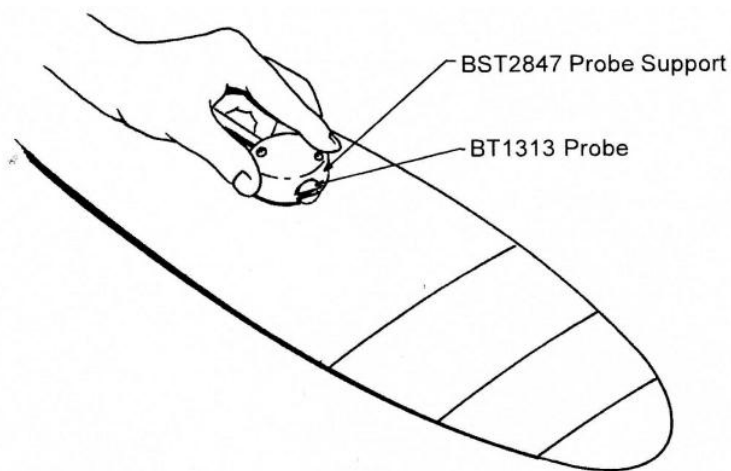


Figura 2.16 – Representação da inspeção da superfície do hélice por CI recorrendo ao suporte adaptado à sonda pontual, desenvolvido pelo fabricante.

Noutras inspeções, que não o *overhaul*, o manual do fabricante indica que é obrigatório proceder à inspeção por CI nas seguintes partes [19]:

- Hélices de ligas de alumínio endurecido, após o processo de remoção de corrosão (Figura 2.16);
- Hélices em alumínio quando existe a suspeita de, através da realização da inspeção visual, existência de fendas no material;
- O raio de retenção de todos os X e V *shank* dos hélices (Figura 2.17);
- O raio do rolamento de todos os Y *shank* de hélices em alumínio;
- O furo de ajuste da lubrificação em hélices de produção anterior a 1983 - Figura 2.18.

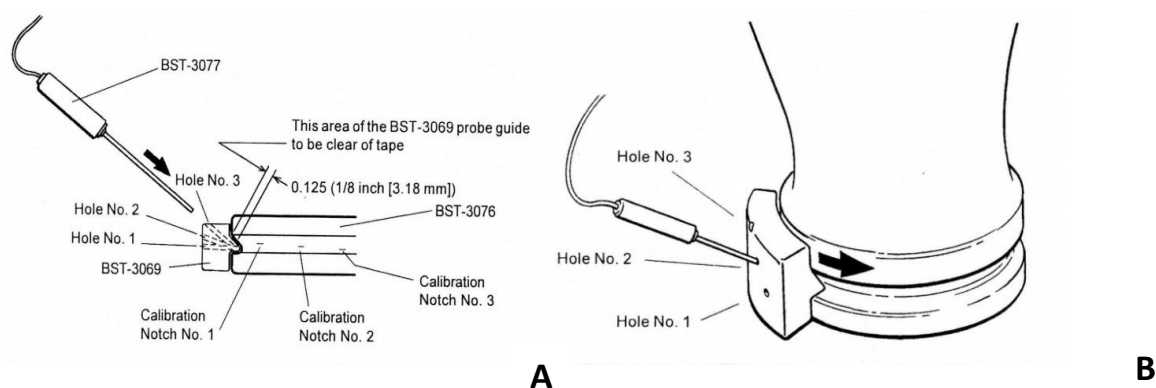


Figura 2.17 – Representação da inspeção por CI do *Shank* em V: a) vista lateral; b) vista geral.

### 2.9.3 - Procedimentos de inspeção por CI opcionais recomendados

O manual do fabricante indica ainda algumas inspeções opcionais que poderão ser realizadas no *overhaul*:

- A inspeção por correntes induzidas de toda a superfície do hélice é opcional mas recomendada durante a inspeção *overhaul*;
- A aplicação da inspeção por CI é fortemente recomendada como método redundante na inspeção dos hélices, principalmente quando surgirem indícios da existência de defeitos na aplicação do método por LP.

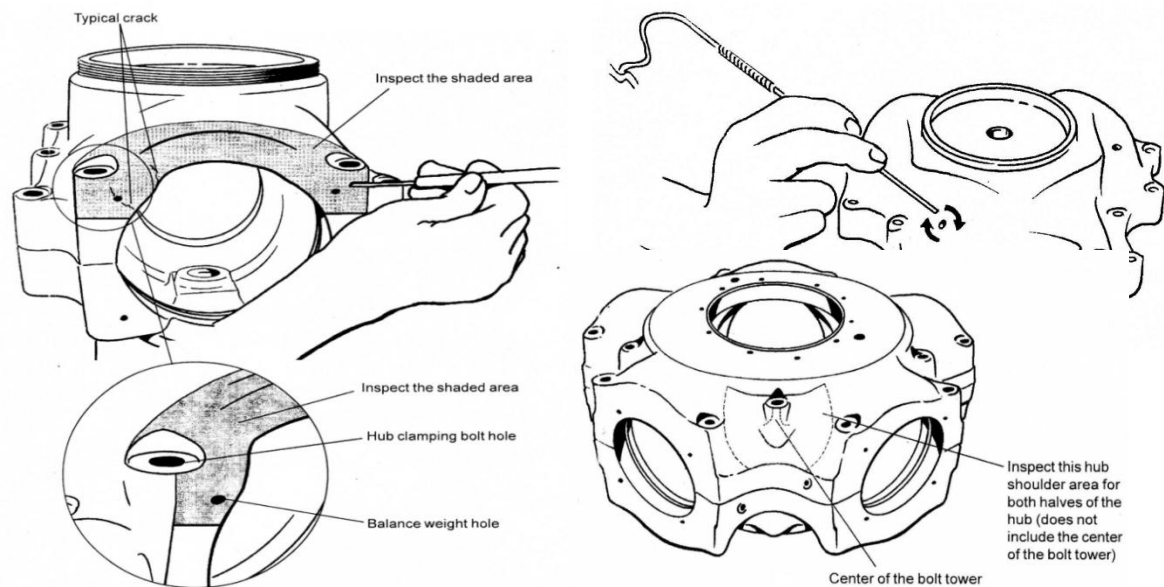


Figura 2.18 – Representação da inspecção aos furos de ajuste da lubrificação.

## **3- Desenvolvimento de sistema automatizado de inspecção de Hélices**

### **3.1- Introdução**

O presente trabalho propõe-se, no âmbito do projecto Aeroinspect, introduzir melhorias nas inspecções realizadas por recursos a técnicas END na empresa Aerohélice. Por melhorias entende-se o aumento da produtividade dos procedimentos, através da redução dos tempos de inspecção dos componentes, e o aumento da fiabilidade e eficácia das inspecções, melhorando a garantia da detectabilidade dos possíveis defeitos. Os métodos actualmente utilizados na inspecção dos hélices, são os LP e CI. Como visto anteriormente, o método END por CI ocupa uma parte muito significativa de todo o procedimento de manutenção e inspecção do hélice, e será o principal alvo de melhoria neste estudo. Apresenta-se o desenvolvimento do protótipo de inspecção automatizada dos hélices, desde a realização do projecto até à fase de construção e montagem. Até à obtenção do protótipo final, foram desenvolvidas três soluções construtivas modeladas em SolidWorks, que foram analisadas e sujeitas a melhorias, para que os requisitos funcionais impostos fossem cumpridos. São analisadas em pormenor as várias etapas até à obtenção do protótipo final.

Em 3.2 abordam-se os pontos que poderão ser alvo de melhorias no processo de inspecção. Em 3.3 particularizam-se as possíveis melhorias a implementar para o caso do hélice, e é realizada uma reflexão sobre as possíveis soluções construtivas para o protótipo de inspecção do componente.

Em 3.4 descreve-se o conceito associado ao protótipo a construir bem como todos os requisitos impostos para o seu desenvolvimento. É com base nestas considerações que se partiu para o desenvolvimento do projecto.

Em 3.5, 3.6 e 3.7 faz-se uma breve análise dos vários protótipos, que resultaram no protótipo construído para realizar as inspecções dos hélices na empresa Aerohélice.

Em 3.8 faz-se uma análise mais detalhada dos vários subsistemas que compõem o protótipo e explica-se a sua evolução até à obtenção da versão que será construída e que fará parte do sistema automatizado de inspecção dos hélices.

Em 3.9 descreve-se o sistema de controlo do protótipo, utilizado para o accionamento dos motores e recepção dos sinais digitais dos fins de curso e sinais analógicos das sondas CI, para posterior armazenamento dos dados de inspecção.

## **3.2 - Pontos de possíveis melhorias nos END**

No âmbito do projecto Aeroinspect, propõe-se realizar melhorias nos procedimentos actualmente utilizados na inspecção dos componentes, com vista a aumentar a sua fiabilidade e eficácia e fundamentalmente, reduzir os tempos de inspecção. No sector Aeronáutico, os custos envolvidos com recursos parados são muito elevados, uma vez que as inspecções periódicas se realizam com grande frequência, e obrigam a que os aparelhos estejam parados. Portanto, os custos associados à manutenção de uma aeronave não se prendem apenas com o custo de inspecção e reparação, mas fundamentalmente com o tempo em que esta se encontra parada. Assim, a redução dos tempos de inspecção destes componentes traz melhorias não só a nível dos custos da própria manutenção, bem como nestes custos indirectos.

Assim sendo, as possíveis melhorias que se podem trazer às inspecções dos componentes aeronáuticos são:

- Redução dos tempos de inspecção dos componentes;
- Aumento da fiabilidade e eficácia na detecção de defeitos da inspecção;
- Redução da solicitação do técnico para tarefas não relacionadas com a interpretação do sinal da sonda;

- Criação de um sistema de arquivação dos dados da inspeção.

Todas estas melhorias contribuem para a redução dos custos de inspeção e, fundamentalmente, para o aumento da fiabilidade da inspeção, contribuindo também para garantir que as boas práticas de inspeção sejam cumpridas, através do registo dos parâmetros de inspeção. Os resultados da inspeção podem ainda ser utilizados em futuras inspeções como controlo da evolução do estado do componente.

### **3.3 - Melhorias a implementar na inspeção do Hélice**

As melhorias enunciadas anteriormente, que poderão trazer grandes melhorias ao processo de inspeção por CI dos hélices, podem ser conseguidas através da criação de um sistema automatizado de inspeção, que permita inspeccionar toda a superfície da pá, bem como a região do shank.

É possível implementar as melhorias referidas recorrendo à construção de um protótipo de inspeção, pois:

- A automatização da inspeção do componente permite aumentar a velocidade de deslocação da sonda no material, diminuindo o tempo total da inspeção;
- O controlo automatizado da sonda recorrendo a motores passo a passo permite garantir que toda a superfície do hélice é percorrida, uma vez que a sonda é movimentada com prescrição de posição por software. No caso da inspeção manual, o técnico que inspecciona o componente não tem qualquer registo ou referência das regiões que já foram inspeccionadas, podendo involuntariamente não inspeccionar toda a superfície;
- A libertação do técnico que realiza a inspeção de tarefas como o posicionamento da sonda no material, a deslocação desta ao longo da sua superfície, e o assegurar que não ocorre lift-off, permite que este se foque exclusivamente na calibração e interpretação dos sinais medidos pela sonda, melhorando a fiabilidade da inspeção;
- O registo de todo o procedimento de inspeção em tempo real permite que se realize um arquivo mais completo do historial do componente, que poderá ser analisado posteriormente, podendo o técnico, em caso de dúvida, recorrer a este, se considerar oportuno confirmar o resultado;



- A implementação de um sistema de alerta para a detecção de defeitos no componente, poderá no futuro servir para a criação de sistemas de inspecção totalmente independentes, que não necessitem de acompanhamento durante o procedimento de inspecção. Actualmente, a vantagem desta ferramenta será a de auxiliar o técnico no processo de inspecção, alertando-o para possíveis defeitos no componente.

Existe ainda o potencial de aplicar métodos END emergentes, tais como as técnicas Phased Array ou CI multi-elementos, bem como métodos ainda em desenvolvimento como a sonda IOnic Probe, e variantes flexíveis que se adaptam à superfície dos componentes, permitindo inspeccionar superfícies maiores em menos tempo, ou inspeccionar geometrias mais complexas.

### **3.4 - Critérios de Projecto**

Na concepção do protótipo do sistema automatizado de inspecção dos hélices foram consideradas as melhorias que se pretendiam obter, enunciadas em 4.3, não comprometendo o desempenho que é actualmente conseguido com a inspecção manual. Do protótipo a desenvolver impôs-se que cumprisse ainda os seguintes requisitos:

- Fácil mobilidade dentro das instalações da empresa Aerohélice, para permitir que este se desloque ao local onde se encontram armazenados os hélices, ou para arrumação do mesmo quando não está em uso;
- Capacidade para armazenamento de hélices que aguardam a realização da inspecção;
- Preocupação com o tempo que requer do técnico de inspecção para a montagem do hélice a inspeccionar, uma vez que este factor será crítico para o impacto que o protótipo trará ao tempo total da inspecção;
- Não exceder 750 mm de largura e minimizar o seu comprimento;
- Garantir que a altura do sistema seja adequada para a realização da inspecção, estando o técnico em pé, com bom ângulo de visão sobre o componente e o equipamento END;
- Possibilidade de acoplamento de um computador para controlo do sistema, bem como recepção dos dados da inspecção e arquivamento dos mesmos, e de um monitor tátil para visualização do layout do software em Labview 2011.
- Orientação do hélice a partir de um sistema mecânico, que permita abdicar do recurso a sensores de distância, contribuindo para a redução dos custos totais do sistema e

consequentemente, para a sua viabilidade económica. O recurso a um sistema puramente mecânico simplifica ainda, após a fase de projecto e obtenção da solução construtiva, a afinação para os diferentes tipos de hélices que poderão ser inspeccionados;

- Aplicação de no máximo, 2 eixos motorizados, sempre na óptica de simplificação funcional e também redução de custos.

### 3.5 - Protótipo #1

A metodologia utilizada para conceber o projecto do protótipo a construir para realizar a inspeção automatizada por CI do hélice conduziu ao desenvolvimento de vários conceitos, resultado de um processo de melhoria sucessiva, até à obtenção do sistema que cumpriu os requisitos impostos. O protótipo #1 corresponde à primeira tentativa realizada (Figura 3.1). Neste ponto analisa-se o protótipo em geral e posteriormente no ponto 3.8 analisa-se pormenorizadamente os vários subsistemas que o compõem, confrontando-os com os equivalentes desenvolvidos para os restantes protótipos, enfatizando os motivos das alterações realizadas, sempre na perspectiva dos requisitos funcionais impostos para o protótipo funcional que será construído.

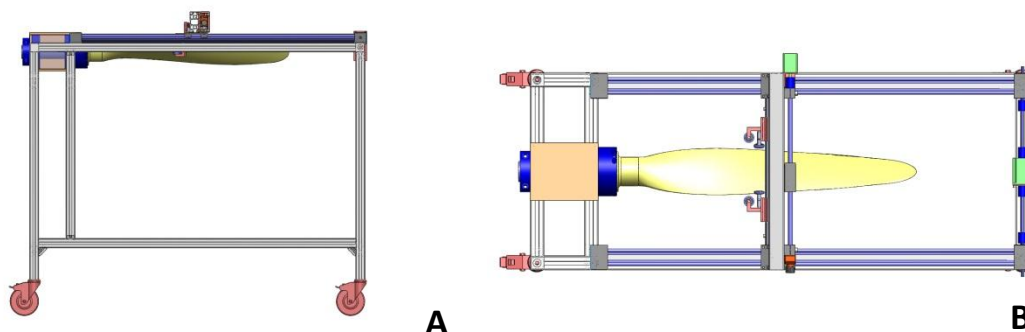


Figura 3.1 – Modelação em SolidWorks do Protótipo #1: a) vista de lado; b) vista de topo.

### 3.6 - Protótipo #2

O protótipo #2 resulta de melhorias realizadas ao protótipo #1. As alterações mais relevantes foram realizadas no sistema de orientação do hélice, Figura 3.2.

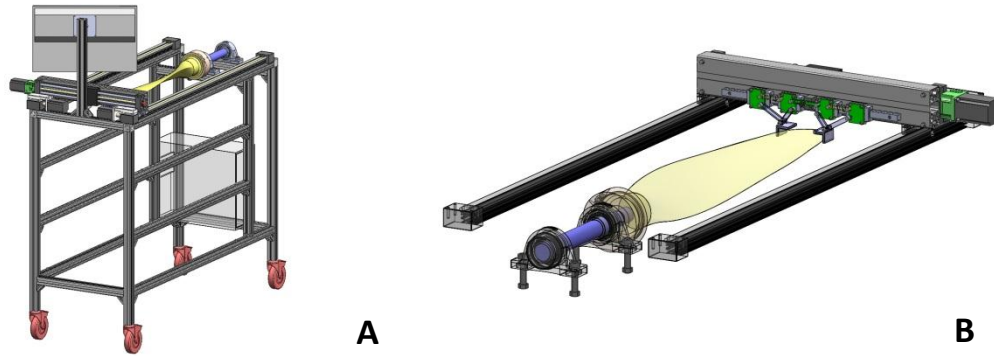


Figura 3.2 - Modelação em SolidWorks do Protótipo 2: a) vista geral; b) vista de pormenor.

### 3.7 - Protótipo #3

No protótipo #3 procedeu-se a uma remodelação do sistema de orientação do hélice e do sistema de suporte do hélice (Figura 3.3).

Após a análise que é apresentada em 5.6, concluiu-se que o protótipo #3 cumpria todos os requisitos impostos, sendo portanto adequado para realizar as inspecções por CI aos hélices, pelo que será o sistema que será construído.

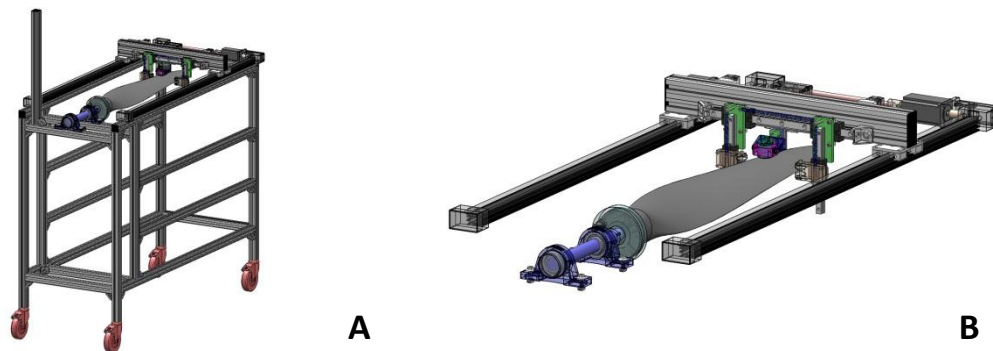


Figura 3.3 - Modelação em SolidWorks do Protótipo #3: a) vista geral; b) vista de pormenor.

## **3.8 - Análise pormenorizada dos módulos do protótipo**

Nos pontos seguintes procede-se a uma análise detalhada dos subsistemas que compõem os 3 protótipos projectados e são explicados os motivos que levaram às opções realizadas e às sucessivas modificações realizadas ao projecto inicial.

### **3.8.1 - Estrutura**

A estrutura do protótipo é responsável pelo suporte de todos os restantes subsistemas, concedendo ao sistema a ligação entre todos os seus componentes. Foram desenvolvidas duas estruturas diferentes, respectivamente no protótipo #1 e no protótipo #2, tendo sido aplicado no protótipo #3 a última desenvolvida.

#### **Conceito 1**

No protótipo #1 desenvolveu-se uma estrutura em perfil Bosch<sup>®</sup> que serve de suporte a todos os componentes que compõem o sistema de inspecção (Figura 3.4). Esta estrutura tem um comprimento de 1300 mm e largura de 635 mm, o que permite realizar a inspecção de hélices com um comprimento de até 1000 mm.

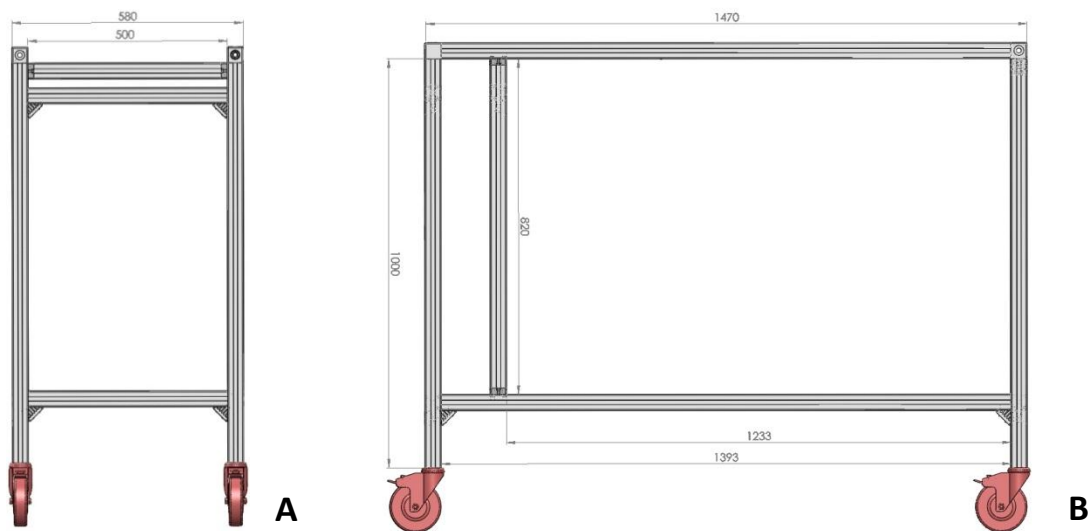


Figura 3.4 – Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 da estrutura: a) vista de frente; b) vista lateral.

Esta estrutura é composta por rodas de 100 mm de diâmetro para permitir a sua mobilidade. Foi criada uma base para integração de um computador, ferramenta que deverá ser utilizada para controlar os motores e armazenar os dados da inspecção.

## Análise

A estrutura desenvolvida permite acoplar todos os componentes que serão introduzidos no sistema de inspecção e a sua mobilidade é assegurada pelas quatro rodas de que é composto. Concluiu-se numa análise posterior que os componentes de que é composto têm alternativas disponíveis mais económicas, desempenhando a mesma função. Existem ainda melhorias que poderão ser feitas a nível das dimensões escolhidas para os perfis.

## Conceito 2

No conceito 2 da estrutura foram substituídos os cubos de fixação, utilizados para a união dos perfis nos cantos, por esquadros de 40 mm, para reduzir o custo envolvido na sua concepção (Figura 4.5). Procedeu-se ainda à substituição do componente de fixação de perfis face a face por esquadros, com o mesmo objectivo. Realizou-se ainda a redução da distância  $x$  para 200 mm, que é o suficiente para

a introdução de uma torre pc mini-atx, que será o equipamento adequado a introduzir neste sistema, uma vez que se pretende manter o comprimento dentro do mínimo exequível.

Procedeu-se também à introdução de 3 prateleiras sendo que as 2 primeiras permitem o armazenamento de 6 hélices que aguardem inspeção ou que já tenham sido submetidos ao processo de inspeção e a última a divisão entre o hélice que é inspeccionado e a restante estrutura.

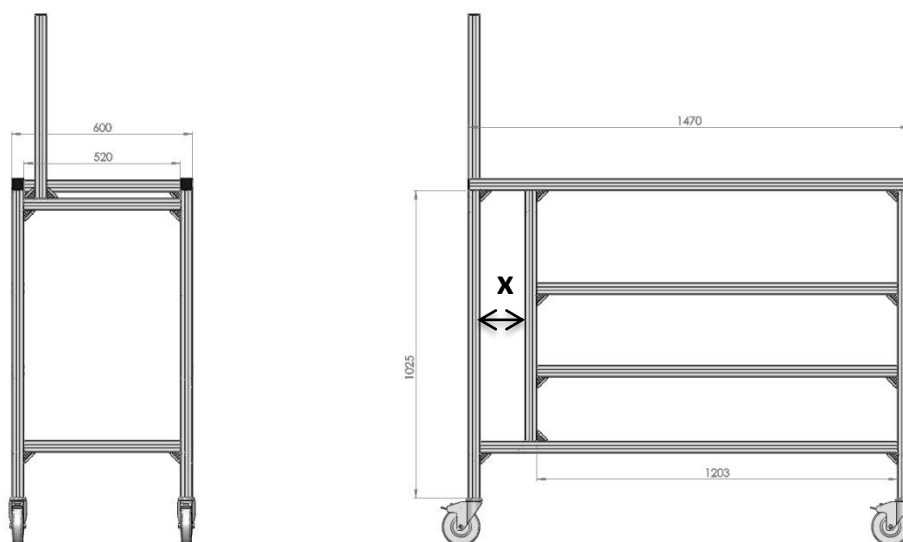


Figura 4.5 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 da estrutura: a) vista de frente; b) vista lateral.

## Análise

O conceito 2 da estrutura permite acoplar todos os componentes que compõem o sistema de inspeção, incluindo a posterior introdução de uma torre de pc mini- ATX e de um monitor tátil. É possível ainda armazenar hélices para inspeccionar ou já inspeccionados, como tinha sido referido em 3.3. A mobilidade do protótipo continua a ser possível pelas rodas de que a estrutura é composta, e as dimensões totais são aceitáveis e permitem que se desloque o sistema dentro da empresa Aerohélice.

### 3.8.2 - Movimento em xx

O movimento em xx é responsável pelo deslocamento da sonda no sentido longitudinal do hélice, ou seja do seu comprimento bem como dos braços orientadores do hélice. As calhas que realizam este movimento, escolhidas no protótipo #1 não foram alteradas nos restantes, tendo-se procedido a melhorias no acoplamento dos motores responsáveis pela transmissão do movimento.

#### Conceito 1

O movimento no sentido do comprimento do hélice (longitudinal) é realizado por duas calhas paralelas Igus ZLW-1040-02-B-100, com um curso de 1200 mm [43]. A transmissão do movimento é realizada por correia, sendo o acoplamento do motor realizado pelo componente da Figura 3.6. Os veios de 12 mm de diâmetro que ligam as calhas aos veios do motor são acoplados por 4 acoplamentos da Ruland [42].

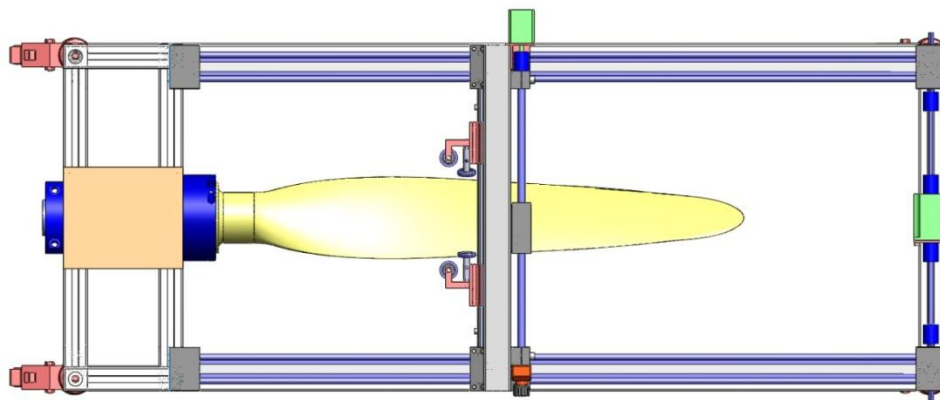


Figura 3.6 – Modelação em SolidWorks do conceito 1 do movimento em xx.

## **Análise**

O conceito 1 do movimento em xx cumpre os requisitos para que é proposto, recorrendo ao desenvolvimento de um componente que realiza o suporte do motor. Esta solução apesar de ser funcional, pode ser melhorada recorrendo a componentes standard já desenvolvidos para o desempenho desta função, melhorando o seu desempenho e reduzindo também os custos do protótipo.

## **Conceito 2**

No conceito 2 do movimento em xx optou-se por aplicar um acoplamento standard Igus MF-1040-NEMA23, Figura 3.7, tendo-se mantido os veios e os acoplamentos Ruland utilizados no anterior conceito [41, 42].

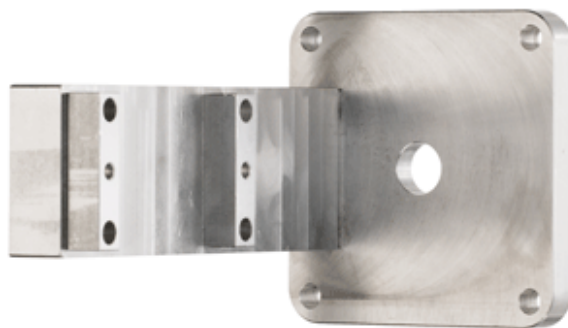


Figura 3.7 - Flange MF-1040-NEMA23 [43].

## **Análise**

Esta solução construtiva, desempenha as funções para as quais foi desenvolvida, pois permite movimentar as duas calhas de correia em simultâneo, e é composta por componentes já desenvolvidos para o exercício destas funções, dando garantias de fiabilidade ao sistema.



### 3.8.3 - Movimento em yy

O movimento em yy é responsável pelo deslocamento da sonda no sentido transversal do hélice, ou seja da sua largura. As calhas escolhidas para a realização deste movimento, escolhida no protótipo #1 não foi alterada nos restantes, tendo-se procedido a melhorias no acoplamento do motor responsável pela transmissão do movimento.

#### Conceito 1

O conceito 1 do movimento em yy é composto por uma calha IguS SHT-12-AWM com um curso de 265 mm. A transmissão do movimento é realizada por um fuso trapezoidal, que permite obter maior precisão que uma calha de correia, na direcção transversal do hélice, em que o curso de movimentação da sonda é menor. O acoplamento do motor é realizado pelo componente representado na Figura 3.8 e o acoplamento dos veios do motor com o fuso da calha é realizado por um acoplamento Ruland [42].

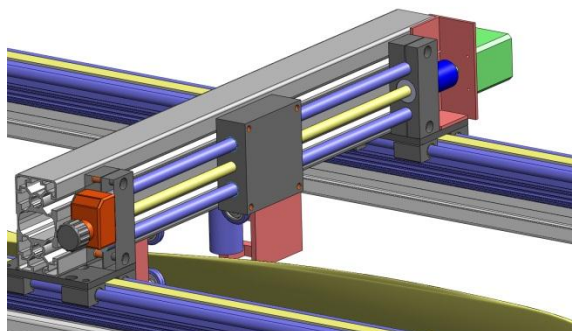


Figura 3.8 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 do movimento em yy.

#### Análise

O conceito 1 do movimento em yy cumpre as funções para que foi desenvolvido mas, tal como no conceito 1 do movimento em xx, pode ser adaptado para acoplar apenas componentes já desenvolvidos, evitando assim a concepção de mais peças, que acarretaria mais custos ao sistema.

## Conceito 2

No conceito 2 do movimento em yy incluiu-se uma flange MF2040-Nema 23, tendo sido mantida a calha de fuso utilizada no anterior conceito, Figura 3.9. O acoplamento do motor com o veio é feito como anteriormente, por um acoplamento do fabricante Ruland, Figura 3.10.

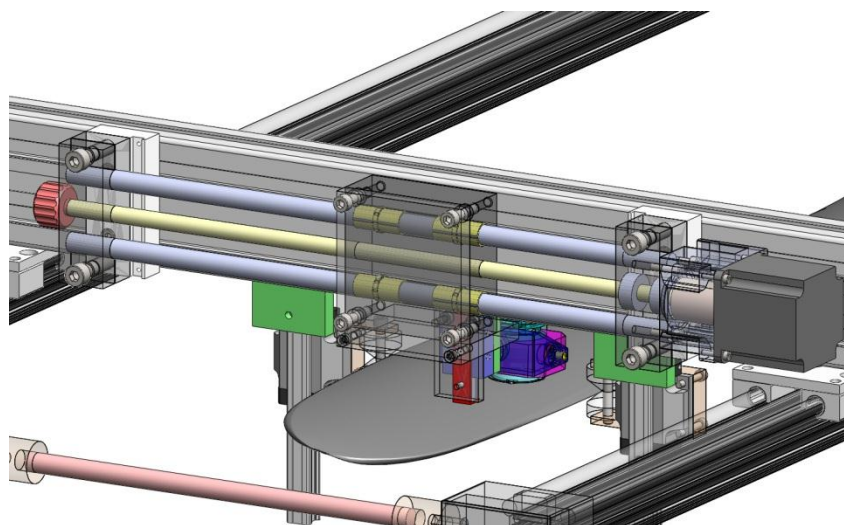


Figura 3.9 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 do movimento em yy.

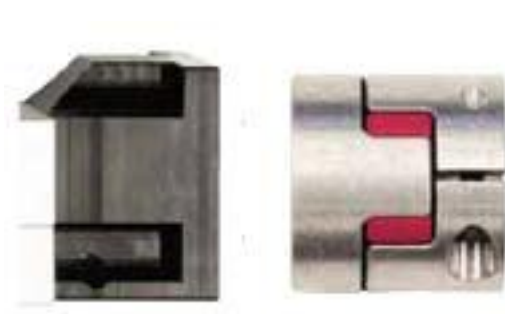


Figura 3.10 - Flange MF2040-Nema 23 e acoplamento do motor [43].

## Análise

A substituição do componente de fixação do motor por uma flange standard já estudada para desempenhar a função é vantajoso, uma vez que permite reduzir os custos de desenvolvimento do protótipo, garantindo que o componente é funcional.

### 3.8.4 – Sistema Mecânico de Orientação do Hélice

A inspecção de END por CI exige que a sonda esteja sempre em contacto com o material e que exista sempre perpendicularidade entre a superfície e a respectiva sonda, para evitar a ocorrência do efeito lift off planar angular. Como a superfície do hélice cuja inspecção se pretende automatizar tem uma geometria helicoidal, é necessário garantir que durante o processo, se ajusta a posição da sonda relativamente à superfície do hélice, para que seja garantida sempre a sua perpendicularidade. Para que isto seja conseguido, pretende-se recorrer a um sistema mecânico baseado num equilíbrio de forças aplicadas por molas, cujo princípio físico é explicado de seguida.

#### Molas – princípio físico

A orientação do hélice a partir de um sistema mecânico, que permita abdicar do recurso a sensores de distância, contribui para a redução dos custos totais do sistema e consequentemente, para a sua viabilidade económica. O recurso a um sistema puramente mecânico simplifica ainda, após a fase de projecto e obtenção da solução construtiva a afinação para os diferentes tipos de hélices que poderão ser inspeccionados.

Horizontalmente aplica-se uma mola à tracção que realiza um par de forças acção-reacção, que garante o contacto permanente entre as rodas e o hélice.

Através da aplicação de molas posicionadas verticalmente, e em cada um dos rolamentos lineares verticais, obtém-se um equilíbrio de forças que garante que estes se encontram à mesma altura e consequentemente, que o bordo de ataque e de fuga do hélice se encontram na mesma linha horizontal, no plano que é inspeccionado.

Equação da energia potencial elástica:

$$E_{p_{elas}} = \frac{1}{2} k \cdot x^2 \quad \text{Equação 1}$$

onde  $k$  [N/m] é a constante de elasticidade da mola e  $x$  [m] a deformação que lhe é imposta.

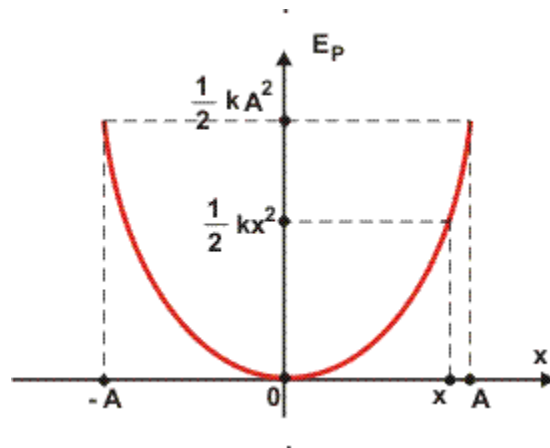


Figura 3.11 - Representação gráfica da energia potencial elástica de uma mola sujeita à tracção.

O gráfico da força elástica da mola corresponde a uma parábola, como representado na Figura 3.11.

Sabendo que o trabalho é equivalente à variação da energia potencial da mola, e derivando-o em ordem a  $x$ , obtemos a equação para o cálculo da força que esta exerce:

$$F = k \cdot x \quad \text{Equação 2}$$

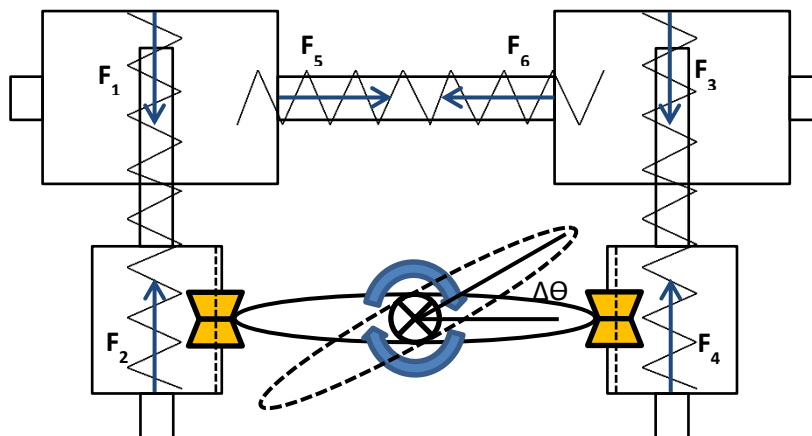


Figura 3.12 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 1).

$$\begin{cases} F_5 - F_6 = 0 \\ F_2 - F_1 = 0 \\ F_4 - F_3 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_5 = F_6 \\ F_2 = F_1 \\ F_4 = F_3 \end{cases} \quad \text{Equação 3}$$

Como as molas verticais têm a mesma constante de elasticidade (Figura 3.12), se existir uma variação de  $\Delta\theta$  relativamente à posição de equilíbrio então  $F_2 > F_4$  e consequentemente o sistema recuperará a sua posição inicial, até que:

$$F_2 = F_4 \quad \text{Equação 4}$$

obtendo-se um equilíbrio de forças entre rolamento linear do lado direito e o do lado esquerdo.

### Conceito 1

No primeiro conceito realizado, a orientação do hélice para que se obtenha a perpendicularidade com a sonda de inspecção é realizada por dois braços compostos por 3 rodas cada, e um rolamento linear com dois patins, como ilustrado na Figura 3.13. Através de quatro molas estes criam um equilíbrio de forças que garante que o bordo de ataque e o de fuga se encontram na mesma linha horizontal.

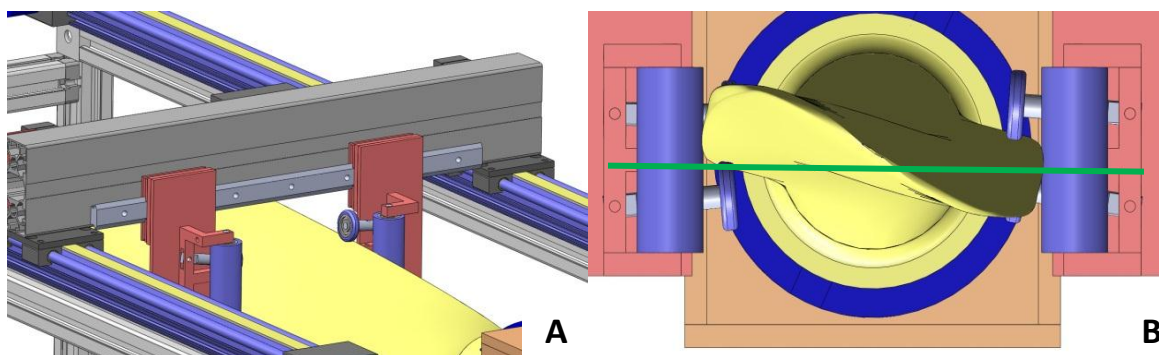


Figura 3.13 – Modelação em Solidworks 2010 do conceito 1 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente.

### Análise

O sistema de orientação do hélice permite o posicionamento do hélice com a sonda CI, mas exige que o hélice se encontre a uma altura pré-definida, uma vez que os braços orientadores não são ajustáveis. A construção deste sistema é complexa e a montagem de um hélice para inspeccionar não é simples, tornando o procedimento muito demorado, o que prejudica o tempo total da inspeção.

## Conceito 2

No novo sistema de orientação do hélice manteve-se o rolamento linear horizontal, mas introduziram-se 4 patins, e acoplaram-se os braços ilustrados na Figura 3.13. O contacto com o hélice é feito por uma base de teflon, material que possui baixo atrito seco. Uma mola introduz uma força descendente em cada lado do hélice e outra garante o contacto permanente da base de teflon com o hélice (Figura 3.14).

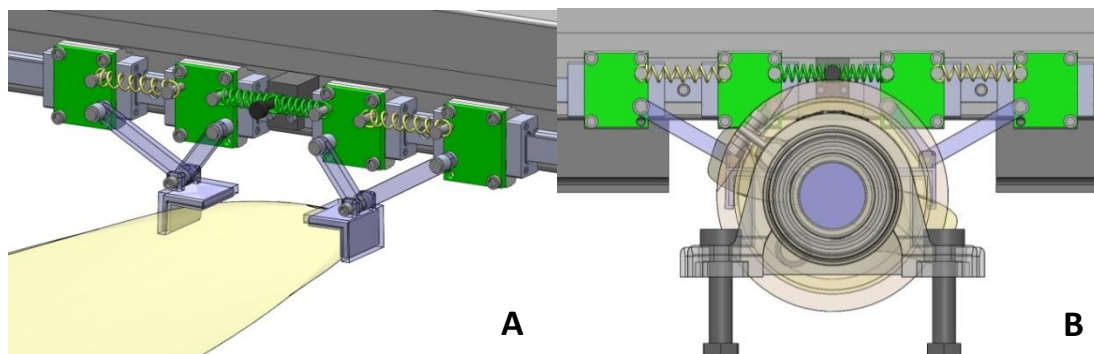


Figura 3.14 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente.

## Análise

O conceito 2 do sistema mecânico de orientação do hélice revelou-se viável para a realização das funções a que é proposto, mas verificou-se que durante o seu funcionamento realiza uma força descendente sobre o hélice, criando um momento na fixação do mesmo que não é favorável ao seu suporte, uma vez que tem o mesmo sentido da força da gravidade.

## Conceito 3

Para garantir que o posicionamento do hélice relativamente à sonda CI permite a perpendicularidade entre os dois, e para corrigir as desvantagens detectadas nos anteriores conceitos, desenvolveu-se um sistema de orientação composto por um rolamento linear Skf LLTH S 20 A 2 T0 - 380 P5 constituído por dois patins, e dois rolamentos lineares Skf LLTH S 15 A 1 T0 - 200 P5 constituídos por um patim cada [44]. Nos patins que se movimentam verticalmente é acoplada uma roda cujo formato corresponde ao perfil negativo do hélice e 4 molas realizam duas

forças verticais e duas forças horizontais. As forças que são aplicadas no bordo de ataque do hélice equilibram-se com as que são aplicadas no bordo de fuga (Figura 3.15).

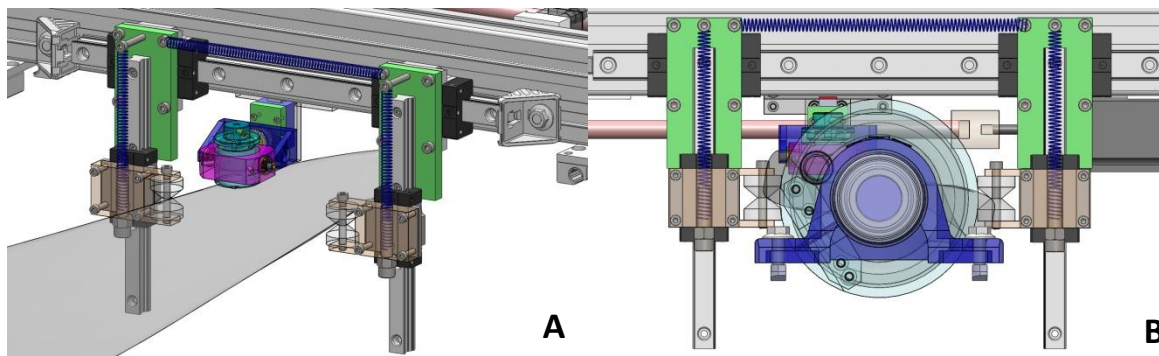


Figura 3.15 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 3 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente.

## **Análise**

O conceito 3 do sistema mecânico de orientação do hélice revelou ser indicado para o desempenho da função a que se propõe, sendo capaz de realizar o alinhamento do hélice com a sonda CI que realiza a inspecção. As forças verticais que realizam o equilíbrio entre o bordo de ataque e o de fuga têm o sentido oposto à força da gravidade, beneficiando o suporte realizado pelo componente de fixação do hélice, e contrariando o momento que neste se desenvolve.

## **4.8.5 - Suporte de Rotação do Hélice**

### **Conceito 1**

O suporte de rotação do hélice é composto por uma caixa em liga de alumínio, 2 rolamentos e duas chumaceiras. O veio aplicado é em aço-inox e tem 40 mm de diâmetro, como ilustrado na Figura 3.16.



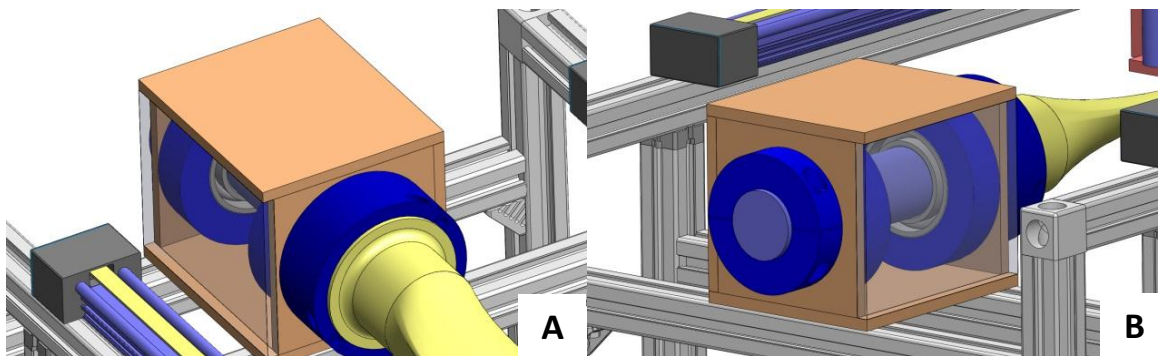


Figura 3.16 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 1 do suporte de rotação do Hélice.

### Análise

O suporte de rotação do hélice é viável mas o seu fabrico seria demorado, tendo custos associados dos componentes de que é composto que não justificam a aplicação em causa. É preferível, se possível, optar pela aplicação de componentes standard, como se procedeu para as flanges dos motores associados aos movimentos em xx e em yy.

### Conceito 2

Optou-se então por aplicar dois mancais Skf que integram um rolamento axial de angulo ajustável, com um diâmetro interno de 40 mm, como ilustrado na Figura 3.17.

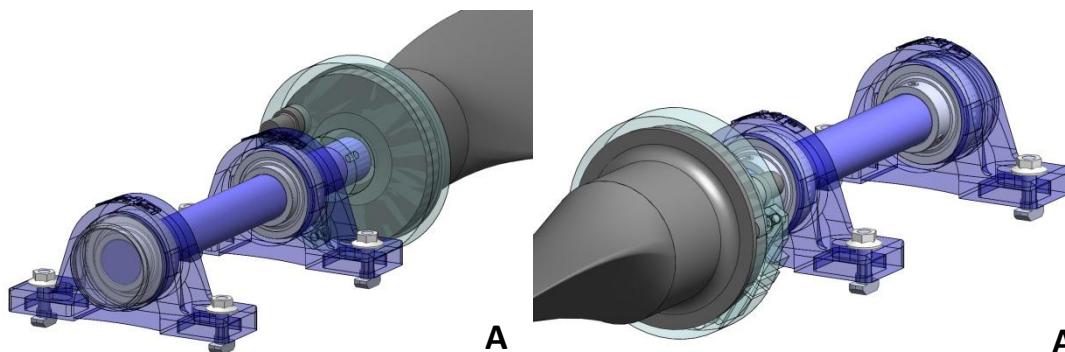


Figura 3.17 - Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 2 do suporte de rotação do Hélice: a) vista isométrica de trás; b) vista isométrica de frente.



## **Análise**

A opção por chumaceiras com rolamentos integrados é adequada para aplicação em causa, mas concluiu-se que a dimensão do veio estava sobredimensionada, pelo que se optou pela aplicação de dois mancais Skf com um diâmetro interno de 30 mm.

## **4.9 – Controlo**

O controlo dos dois motores de passo-a-passo é feito por dois módulos da National Instruments - NI 9501 integrados num Chassi NI Crio 9074 [19]. No início e no fim do curso do movimento longitudinal e do movimento transversal da calha é inserido um fim de curso controlado por um módulo Input de sinais digitais 9421, compatível com o Chassi Crio 9074.

Inclui-se no sistema ainda um módulo de aquisição de sinais analógicos, NI 9211, para leitura do sinal obtido pela sonda de inspecção, o que permitirá o armazenamento dos dados de inspecção.

## **4 - Construção do Sistema automatizado de inspecção**

### **4.1- Introdução**

Neste capítulo faz-se uma apresentação do processo de construção do Sistema automatizado de inspecção. São descritos os métodos de fabrico aplicados para a construção de cada componente e descritas as alterações que foram introduzidas no projecto nesta fase, quando se verificou que tal era necessário.

### **4.2 – Construção**

A construção do protótipo realizou-se no laboratório de tecnologia mecânica da FCT. Foram desenvolvidos diversos componentes projectados especificamente para o protótipo (Anexo 1.6). A estrutura do sistema é composta por perfis Rexroth 40X40 mm acoplados através de esquadros compatíveis, cujo contacto ao chão é realizado por 4 rodas de 100 mm de diâmetro - Figura 4.1.



Figura 4.1 – Imagem da construção do sistema automatizado de inspeção.

As guias lineares de correia que realizam o movimento longitudinal (ao longo do comprimento do hélice) são fixas à estrutura através de 4 chapas de alumínio (2 em cada face) posicionadas como ilustrado na Figura 4.2. O acoplamento do motor de duplo veio é realizado pelo componente Igus MF-1040-NEMA23 [43].

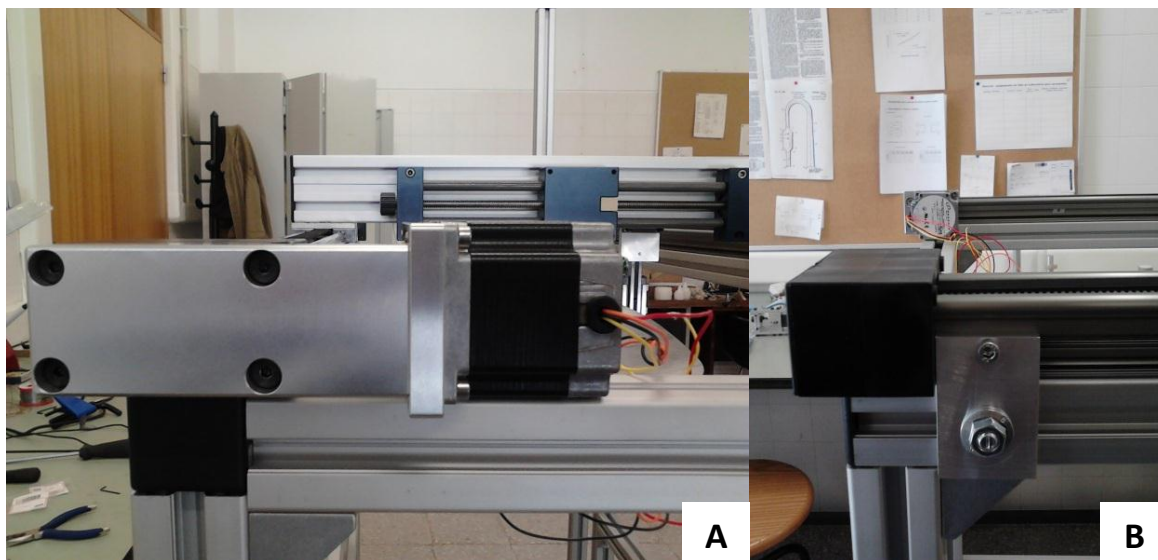


Figura 4.2 – a) Acoplamento do motor responsável pelo movimento em xx; b) Peça de fixação da calha de correia.

O acoplamento dos veios das guias lineares ao motor é realizado através de um acoplamento do fabricante Ruland, sendo que na calha mais distante ao motor será aplicado um veio de 12 mm de diâmetro.

O elemento de ligação entre os dois patins das guias lineares de correia é um perfil Rexroth 40x80 mm com 635 mm de comprimento, disposto transversalmente ao hélice, e fixo através de 2 porcas trapezoidais e respectivos parafusos sextavados interior M5.

No elemento de ligação é fixo um rolamento linear Skf LLTH de 20mm cuja calha tem 20 mm de largura e 380 mm de comprimento, com 2 patins [44]. A fixação é realizada através de 2 porcas trapezoidais e respectivos parafusos sextavados interior M5. Entre os patins colocou-se uma mola à tracção, que realiza uma força que favorece a aproximação entre estes.

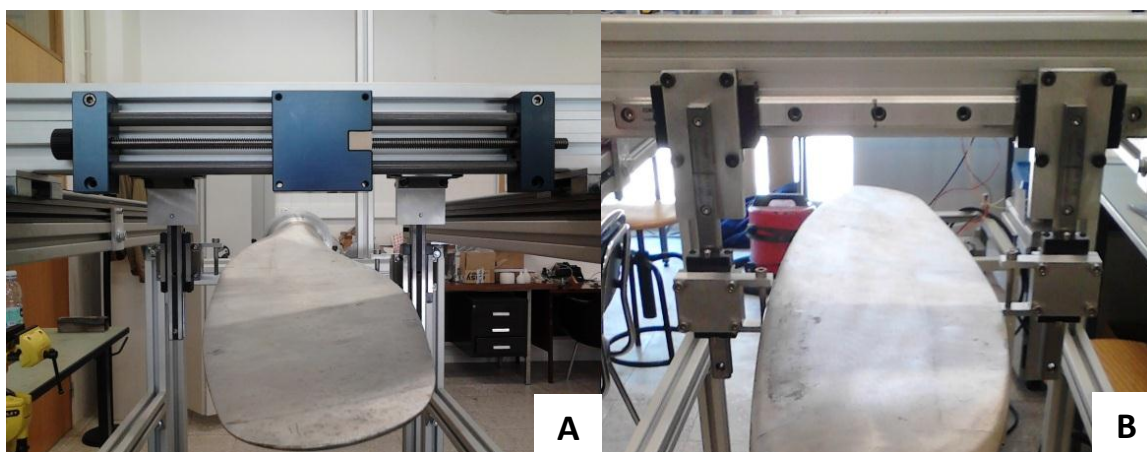


Figura 4.3 – a) Calha de fuso; b) Braços de orientação do Hélice.

Perpendicularmente a esta calha, e fixo através de uma chapa de alumínio em cada patim (Figura 4.3), fixou-se a calha do rolamento linear Skf LLTH de 15 mm de largura e 200 mm de comprimento [44]. A chapa é composta por 4 furos passantes para fixação ao patim de 20 mm, através de parafusos M6, e 2 furos roscados para fixação da calha de 15 mm. Em cada patim colocou-se uma mola à tracção alinhada verticalmente, que realiza uma força vertical, e no sentido ascendente.



Figura 4.4 – Pormenor do braço de orientação do Hélice.

Em cada patim de 15 mm fixou-se uma chapa de 15 mm de espessura maquinada que acopla a roda de contacto com o hélice, através de 4 parafusos sextavados interior M5 - Figura 4.4.

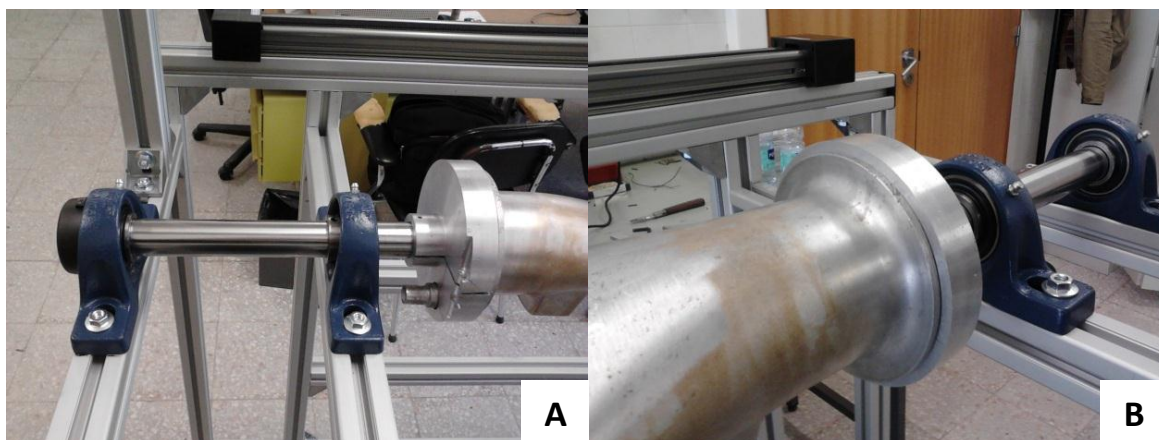


Figura 4.5 – Suporte de rotação do Hélice: a) suporte de rotação; b) peça de fixação.

A rotação do hélice é feita através de dois mancais Skf SYJ 30 TF distanciados de 200 mm, e um veio de 30 mm de diâmetro em aço inox, com 300 mm de comprimento [44]. O acoplamento do hélice ao veio é feito através de uma peça em alumínio, com a geometria apresentada na Figura 4.5.

### 4.2.1 - Fixação do Hélice

A componente de fixação do hélice projectado inicialmente possuía dimensões incompatíveis com o material disponível para a sua construção, pelo que se realizaram as adaptações necessárias à sua concepção, Figura 4.6.

Após concebido o componente, verificou-se que o aperto que esta realizava no hélice não era suficiente para que esta se sustentasse. Numa análise do componente, concluiu-se que o momento de inércia deste era demasiado elevado para que se obtivesse, com o aperto do parafuso, uma fixação do hélice, tendo-se procedido a uma remodelação do componente, com a redução da sua espessura e a introdução de duas peças de aperto em aço inox, fixas ao componente através de parafusos sextavados interior de cabeça cónica. A espessura do componente de fixação reduziu-se a 7 mm, pelo que a abertura de rosca neste se tornaria frágil, devido ao material de que é composto (alumínio vazado), tendo-se optado pela abertura de rosca na peça de fixação, sendo estas fixas pelos parafusos sextavados interior de cabeça cónica, que ficam embutido no material do componente principal.

A redução da espessura do componente permitiu reduzir o seu momento de inércia e consequentemente reduzir a força necessária para realizar o aperto do rasgo.

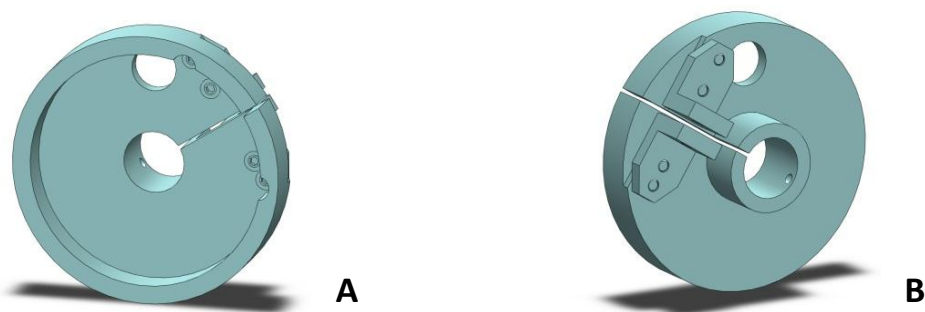


Figura 4.6 – Peça de fixação do Hélice: a) vista posterior; b) vista anterior.

Ao testar o componente modificado, verificou-se que o aperto realizado não era suficiente para fixar o hélice durante o processo de inspecção. Verificou-se ainda que ocorria a flexão do componente de fixação num sentido contrário ao que era pretendido. Ocorreu ainda a fissuração do componente na região dos furos de fixação das peças de aperto, devido à pequena espessura da parede.

Na análise aos resultados verificados no teste do componente concluiu-se que a região onde estão aparafusadas as peças de aperto não era frágil. O veio de suporte do hélice também não favorece o aperto do hélice, uma vez que realiza um constrangimento do aperto do componente em causa.

Projectou-se um novo componente de fixação do hélice, composto por sete peças em aço inox soldadas, submetidas posteriormente a um processo de corte. A escolha do material teve em conta a boa soldabilidade que este possui, bem como as boas propriedades mecânicas.

Na primeira peça realizada, recorreu-se ao material disponível no laboratório, sendo o raio do componente inferior ao raio externo do hélice. No teste do componente verificou-se que o facto do raio do componente ser inferior ao raio externo do hélice não permitia o encosto entre estes, pelo que o aperto não foi bem sucedido. Concluiu-se que na região de apoio ao veio de rotação do hélice não se deveria proceder ao corte, de forma a garantir a união entre as duas partes do componente.

A opção pela realização de dois rasgos no componente revelou-se indicada, uma vez que permite distribuir a força necessária para realizar o aperto ao hélice por dois parafusos, o que não acontecia no primeiro componente desenvolvido. A opção pela construção do componente em aço inox, permitiu reduzir a sua espessura.

#### **4.2.2 - Roda de contacto com o hélice**

O componente que realiza o contacto com o hélice, e que permite a sua orientação para que se obtenha a perpendicularidade entre a sua superfície e a sonda de inspecção, foi construído com o recurso a varão de teflon de 25 mm, e maquinado no torno mecânico. O material aplicado possui baixo atrito seco, para assegurar que no contacto permanente existente entre a roda e o hélice se reduzem as forças de atrito ao mínimo, bem como para assegurar que o material do hélice não é danificado no processo de inspecção.

A sua geometria foi otimizada de forma a garantir que, durante o processo de inspecção existe sempre contacto das duas faces do hélice com as duas superfícies da roda, tanto no bordo de fuga como no bordo de ataque, como ilustrado na Figura 4.7. O contacto é essencial, pois é com base no equilíbrio das forças que se geram em cada uma das rodas do sistema, que se obtém a orientação do hélice com a sonda. Durante o processo de inspecção, o hélice tende a posicionar-se

sempre no canto existente na roda, devido às forças que estão aplicadas, garantindo-se assim que o bordo de ataque e o bordo de fuga se encontram na mesma linha horizontal. Durante a construção da roda de contacto concluiu-se que as características do material de que é composto permitiam a exclusão da aplicação de rolamentos devido ao baixo atrito seco que este material possui. A opção por não se aplicar rolamentos revela-se uma mais valia, uma vez que se trata de um componente consumível, pelo que permite a redução de custos de maquinação no futuro.



Figura 4.7 – Modelação em Solidworks da Roda de Contacto com o Hélice: a) versão com caixa para rolamento 635ZZ; b) versão sem caixa para rolamento.

#### 4.2.3 - Peça de fixação da sonda

A localização dos braços orientadores do hélice encontra-se a 100 mm de distância da calha de fuso, responsável pela movimentação transversal ao hélice da sonda de inspecção. Esta diferença faz com que a zona que é inspeccionada não se encontre perpendicular à superfície do hélice que é inspeccionada, uma vez que a geometria do hélice muda consideravelmente. Para corrigir esta diferença, desenvolveu-se o componente de suporte da sonda ilustrado na Figura 4.8, que permite posicionar a sonda no mesmo plano dos dois braços orientadores, garantindo-se assim que esta se encontra perpendicular à superfície a inspeccionar.





Figura 4.8 - Modelação em Solidworks da peça de fixação da sonda: a) vista isométrica; b) vista de lado.

#### 4.2.4 - Braços Orientadores

O que caracteriza o conceito deste protótipo é o sistema de braços orientadores, que permite ajustar a posição do hélice, para garantir que a sua superfície se encontra sempre perpendicular à sonda CI. Este sistema é composto por um rolamento linear de 20 mm, com dois patins que acoplam cada um, outro rolamento linear de 15mm colocado transversalmente, e que é composto pela roda descrita em 4.2.2.

#### Conceito 3

O Conceito 3 é constituído por uma mola horizontal à tracção fixa aos dois rolamentos lineares de 20 mm, criando um par de forças que tende a aproxima-los.

Cada um dos rolamentos lineares verticais são compostos por uma mola à tracção que tende a deslocá-los para cima.

No teste feito a este sistema, verificou-se que ocorria um desequilíbrio entre o contacto do lado esquerdo e o contacto do lado direito, não havendo forma de ajustar a força realizada pelas molas. Ocorria um ligeiro ajuste do ângulo da pá quando se deslocavam os braços orientadores, mas não para a posição horizontal, adequada para a realização da inspecção.

#### Conceito 4

Verificando que no Conceito 3 dos braços orientadores não era possível ajustar a força exercida por cada uma das molas, pelo que se procedeu a uma alteração no sistema, inserindo um mecanismo de ajuste da deformação elástica imposta à mola -Figura 4.9. Isto é conseguido fazendo a mola passar pelo interior da fixação da roda de contacto, e acoplando um parafuso na sua ponta com uma contraporca a servir de batente. Ao enroscar a porca, é possível aumentar a deformação elástica a que a mola está sujeita, aumentando ou diminuindo assim a força que esta exerce sobre o rolamento linear.

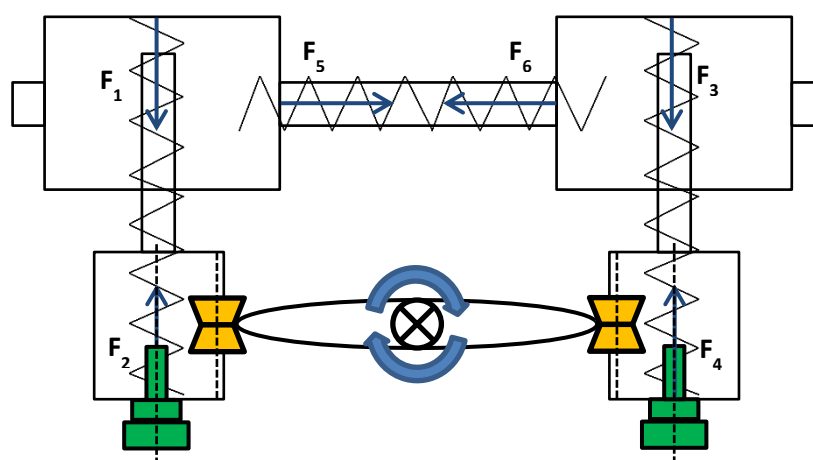


Figura 4.9 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 4).

O ajuste das forças envolvidas passou a ser possível mas verificou-se que na prática o equilíbrio de forças que se obtinha com esta configuração não era suficiente para que o hélice se autocompensasse (Figura 4.10). Verificou-se que posicionando o hélice horizontalmente (como se pretende que a inspeção seja realizada) e deslocando os braços no sentido longitudinal do hélice, se obtinha o alinhamento do hélice. No entanto, quando se realizava um desequilíbrio manual na orientação do hélice, os braços não o compensavam automaticamente, ou seja não se garantia o retorno instantâneo à posição.

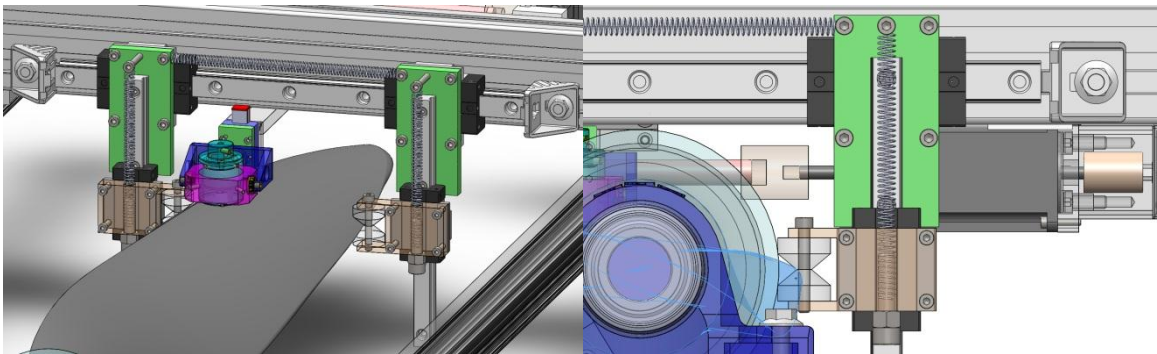


Figura 4.10 - Modelação do Conceito 4 dos braços orientadores em Solidworks 2010: a) vista geral;  
b) vista frontal.

Verificou-se ainda que realizando uma rotação manual do hélice acentuada, desequilibrando-o, as rodas tinham tendência a escapar do contacto com o hélice, uma vez que o sistema minimizava a força da mola horizontal, preferencialmente ao par de molas vertical.

Procedeu-se ainda à redução da força da mola horizontal para corrigir este último problema, mas a função da mola de garantir o contacto permanente das rodas com o hélice deixava de ser conseguido.

#### **Conceito 4 – variante**

Analisando o resultado obtido no teste do Conceito 1, concluiu-se que a força vertical que era aplicada pelas molas verticais não era suficiente para vencer o binário resistente criado pela rotação do hélice e todos os atritos associados aos rolamentos lineares e contactos com o hélice.

Procedeu-se então à aplicação de duas molas de maior comprimento, desenvolvendo-se um componente que permitiu deslocar o ponto de fixação da mola ao rolamento linear para baixo - Figura 4.11.

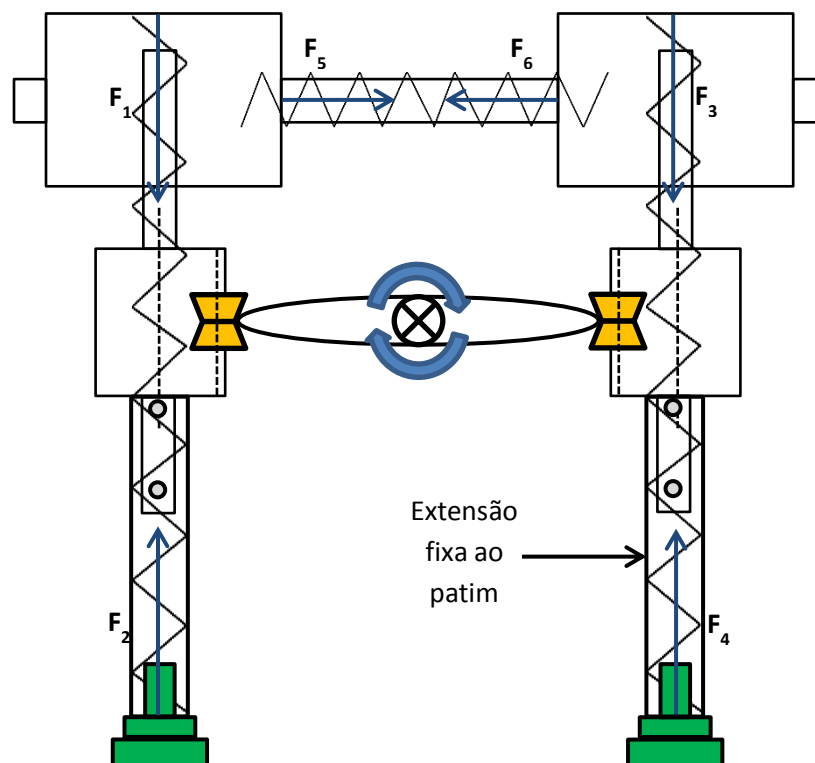


Figura 4.11 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 4 – variante).

O teste desta variante não foi funcional. O aumento das forças verticais não foi suficiente para vencer o binário resistente e os atritos associados e piorou o efeito de minimização da força horizontal, ou seja, as rodas de contacto passaram a ter maior tendência a escapar do contacto com o hélice (Figura 4.12).

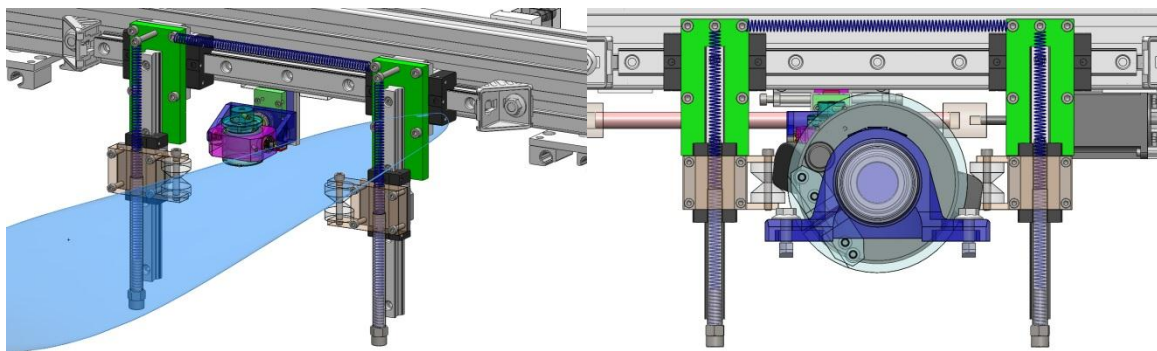


Figura 4.12- Modelação em SolidWorks 2010 da variante do conceito 4 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente.

## Conceito 5

Procedeu-se então a uma reconfiguração do Conceito 4 dos braços orientadores. Concluiu-se que no Conceito 4 não se conseguiu obter o equilíbrio entre as forças verticais dos dois rolamentos lineares verticais (Figura 4.13).

A solução para este problema, visto que não é possível nem vantajoso aumentar as forças envolvidas, foi criar um equilíbrio de forças em cada um dos rolamentos lineares verticais, independentes um do outro. Para isto, projectou-se um sistema em que cada um dos rolamentos lineares possui duas molas à tracção que realizam forças em sentidos opostos. Na realidade, as duas molas traccionadas em sentidos opostos correspondem a apenas uma mola que é fixa no centro do rolamento linear por um parafuso (Figura 4.13, ponto vermelho). Desta forma, ambos os rolamentos se encontram num mesmo ponto de equilíbrio que é pré-estabelecido, e que corresponde ao mesmo ponto onde se encontram o bordo de ataque e de fuga do hélice. A força que é realizada sobre o hélice é muito menor, pois quando este se encontra alinhado, também os rolamentos lineares estarão sujeitos a um equilíbrio de forças, e nenhuma força é aplicada no hélice.

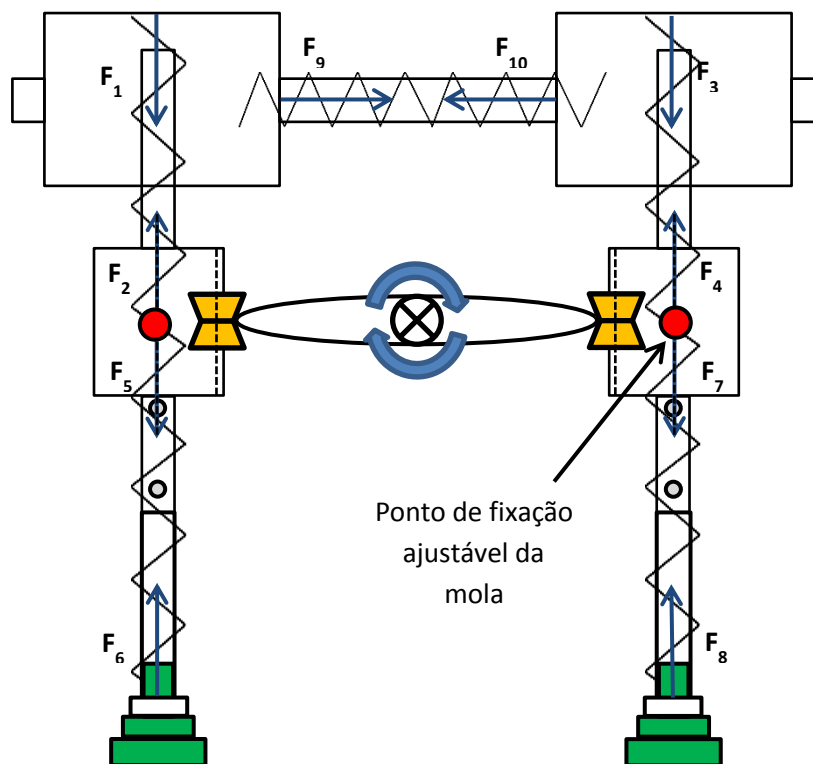


Figura 4.13 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 5).

$$\begin{cases} F_9 - F_{10} = 0 \\ F_2 - F_5 = 0 \\ F_4 - F_7 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_9 = F_{10} \\ F_2 = F_5 \\ F_4 = F_7 \end{cases}$$

O teste deste conceito revelou-se vantajoso na montagem do hélice para inspecção, uma vez que deixou de ser necessário vencer a força das molas verticais para alinhar as rodas de contacto com os bordos de ataque e de fuga do hélice (Figura 4.14).

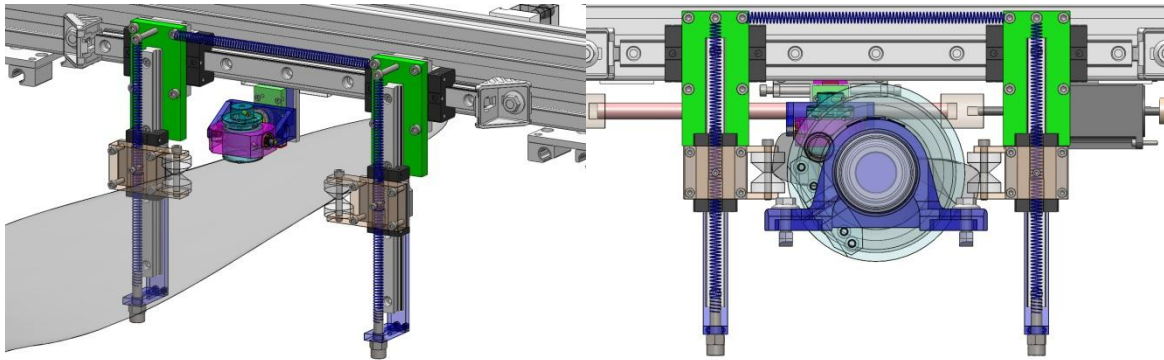


Figura 4.14- Modelação em SolidWorks 2010 do conceito 5 dos braços de orientação do Hélice: a) vista geral; b) vista de frente

O mecanismo de equilíbrio vertical foi conseguido, no entanto, identificou-se um problema relacionado com o facto de energeticamente ser mais favorável a contracção da mola horizontal, mesmo sendo feita à custa da tracção/compressão das molas horizontais.

### Conceito 5 – variante

O problema detectado deve-se ao facto da mola horizontal privilegiar o desalinhamento do hélice, uma vez que é nessa posição que ela se encontra menos traccionada e consequentemente, onde a sua energia potencial é mínima.

Para corrigir este problema, deslocou-se o ponto de aplicação desta mola para os rolamentos verticais, pois assim, o desalinhamento do hélice não influencia a tracção a que esta mola está sujeita e o sistema deixa de poder minimizar esta força, minimizando assim as forças verticais, que tendem para o ponto de equilíbrio preestabelecido, que corresponde ao alinhamento do hélice.- Figura 4.15.

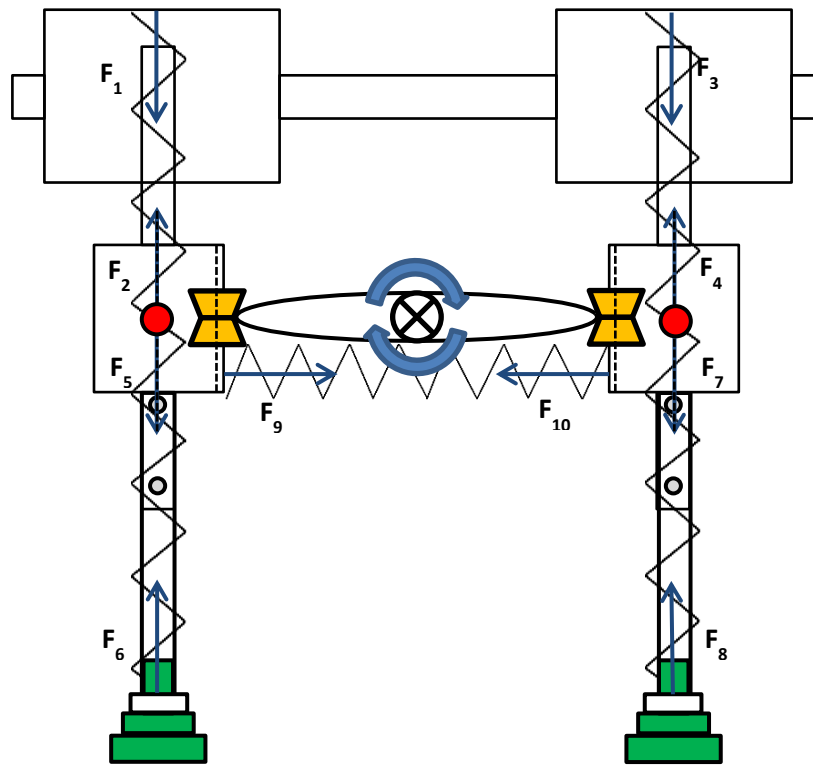


Figura 4.15 - Representação do conceito físico dos braços orientadores do hélice (Conceito 5 - variante).

Esta variante mostrou ser funcional, uma vez que a autocompensação do hélice é conseguida. A montagem do hélice para inspeção é simples, e pode ser realizada pelo técnico de inspeção, bem como o ajuste do alinhamento do hélice, que é conseguido através do ajuste dos parafusos que fixam as molas verticais centralmente, e pelo parafuso de ajuste do comprimento da mola. O tempo de montagem de um hélice para realizar a inspeção foi reduzido quando comparado com as anteriores soluções propostas.

### 4.3 - Controlo do Sistema

O controlo dos motores de passo foi realizado por um equipamento NI CRIO 9074, com capacidade para suportar até 8 módulos.

Para a realização do controlo dos motores de passo, utilizaram-se 2 módulos - drives de motor de passo NI 9501. Este equipamento permite o controlo de motores de passo bipolares, realizando a excitação alternada das bobinas.

A aquisição do estado dos fins de curso foi realizada por 1 módulo de aquisição de sinais digitais NI 9421. No fim de curso é introduzida uma tensão de 24v, que sai deste directamente para uma entrada digital do módulo. Sempre que o fim de curso é accionado, o circuito é interrompido, e o módulo deixa de receber o sinal.

A aquisição do sinal analógico obtido pela sonda de CI que realiza a inspecção foi realizada por 1 módulo de aquisição de sinais analógicos NI 9211. O aparelho de END de CI Nortec 500D recebeu o sinal da sonda e enviou-o para uma entrada do módulo.

A alimentação do NI CRIO 9074, dos 2 módulos drives de motor de passo NI 9501 e dos 2 fins de curso foi realizado por uma fonte de alimentação NI PS-16, com uma tensão de saída de 24VDC.

## **4.4 - Integração dos Sistemas de Inspecção**

Os 2 sistemas de inspecção desenvolvidos no âmbito do Projecto Aeroinspect (inspecção de Hélices e de Jantes) foram integrados numa única estrutura, onde foi instalada toda a electrónica de controlo necessária, Figura 4.16.

Foi realizado um comando de controlo manual dos motores compatível com os 2 sistemas. Este comando integra 4 botões que realizam os vários sentidos dos motores, um botão de alternância entre os sistemas e um botão de paragem de emergência. O acionamento do botão de emergência interrompe de imediato o movimento dos motores, quer este se encontre em modo manual ou automático. Uma vez que este botão se encontra definido para não passar corrente quando não está premido (o que incrementa o nível de segurança do dispositivo de paragem), o comando funciona ainda como chave dos 2 sistemas, uma vez que estes não funcionarão se este não estiver introduzido.





Figura 4.16 - Integração do sistema de inspeção de furos de Jantes com o de inspeção de hélices.

#### 4.5 - Software em Labview para controlo do protótipo

Foi desenvolvido em Labview 2011 um software que integra o controlo dos 2 sistemas de inspeção desenvolvidos, o do hélice e o da jante.

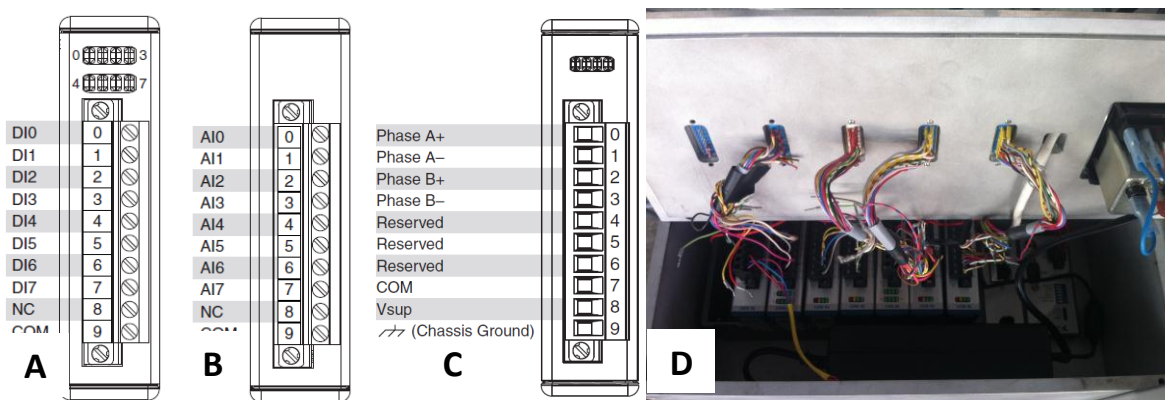


Figura 4.17 - Identificação das entradas dos módulos: a) NI 9421; b) NI 9211; c) NI 9501; d) fotografia do aparato de controlo.

O Software realiza o controlo do Chassi CRIO 9074 que acopla os seguintes módulos:

- Módulo 1 – NI 9501: Drive de controlo do motor do movimento x do Hélice (Figura 4.17);

- Módulo 2 – NI 9501: Drive de controlo do motor do movimento y do Hélice;
- Módulo 3 – NI 9421: Recepção dos sinais digitais dos fins de curso dos dois sistemas (Figura 4.17);
- Módulo 4 – NI 9501: Drive de controlo do motor do movimento de rotação da Jante;
- Módulo 5 – NI 9501: Drive de controlo do motor do movimento de profundidade da Jante;
- Módulo 6 – NI 9423: Recepção dos sinais digitais do comando de controlo manual dos sistemas;
- Módulo 7 – NI 9472: Envio dos sinais digitais para os Led's de sinalização do comando;
- Módulo 8 – NI 9211: Recepção dos sinais analógicos do aparelho de correntes induzidas (Figura 4.17).

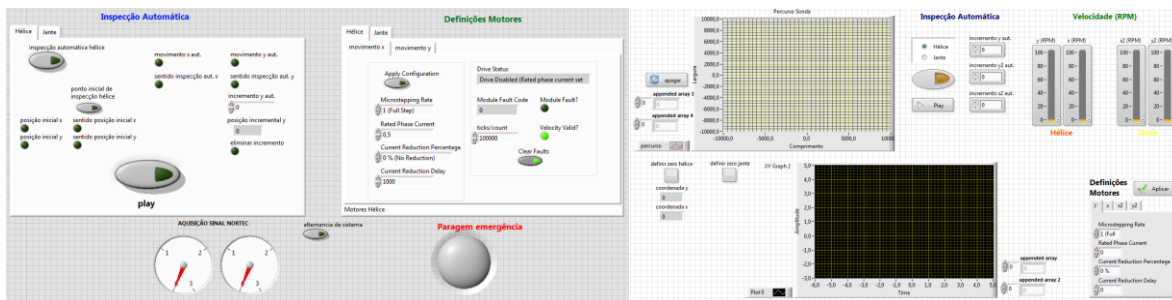


Figura 4.18 - Layout do software em Labview 2011 para recepção do sinal analógico da sonda CI;  
b) analisar os sinais analógicos da sonda CI, com as componentes real e imaginária representadas separadamente.

O layout do software desenvolvido (Figura 4.18) permite o ajuste do controlo dos motores através das “Definições dos Motores”:

- Microstepping Rate – esta especificação permite optar se a drive realiza um controlo electrónico específico que permite a realização de fracções de passo ou seja, o incremento mínimo de rotação do motor ser inferior aos 200 passos por volta que estão definidos por catálogo no motor. A opção por este tipo de controlo apesar reduzir a velocidade máxima

de rotação do motor, permite a suavização do movimento do motor, o que é uma vantagem quando se pretende a redução das vibrações associadas;

- Rated Phase Current – Esta especificação permite definir a corrente por fase que é enviada para o motor em cada estímulo elétrico. Neste parâmetro devem ser respeitados os limites impostos para o motor em catalogo;
- Current Reduction Percentage – Esta opção permite definir um valor percentual de redução da corrente enviada para as bobinas do motor quando este não está em movimento. Esta opção permite reduzir o aquecimento das mesmas e consequentemente reduzir a sobrecarga sobre o motor;
- Current Reduction Delay – Esta opção regula o tempo de transição entre o movimento do motor e a redução percentual da corrente definida em “Current Reduction Percentage”;
- Em “Velocidade (RPM)” define-se a velocidade de rotação dos motores.

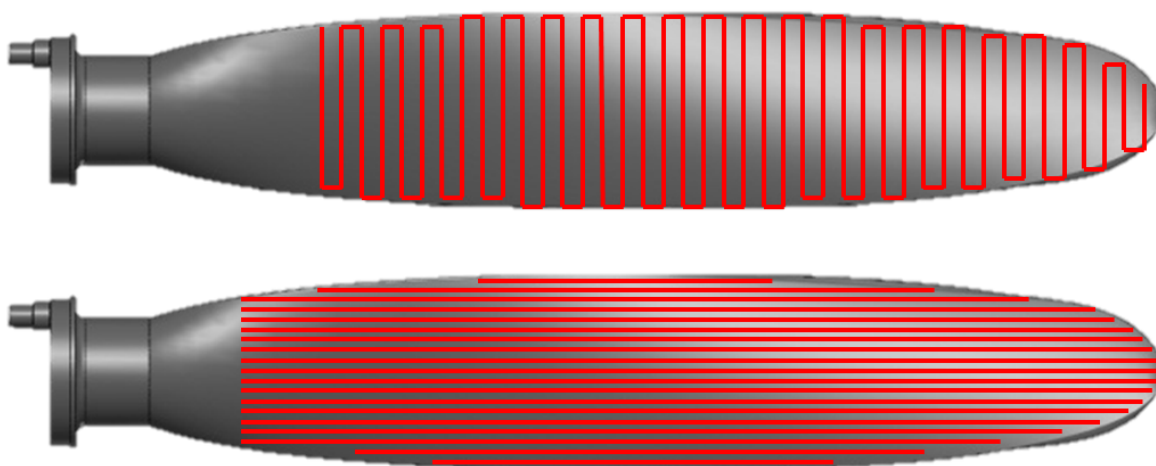


Figura 4.19 - Representação do percurso realizado pela sonda CI na inspeção automática do Hélice: a) varrimento transversal; b) varrimento longitudinal.

Tabela 1 – Especificações dos eixos do sistema de inspeção.

X – movimento no sentido longitudinal do hélice; Y - movimento no sentido transversal do hélice

	Velocidade máxima (mm/s)	Resolução (mm)	Curso útil de inspecção (mm)
X	114	0,1	250
Y	6	0,02	900

Em “Inspecção automática” define-se os parâmetros necessários para a realização autónoma da inspecção do componente, limitadas pelas especificações referidas na Tabela 1. Estes são definidos para cada um dos sistemas de seguida:

Sistema de inspecção de Hélices:

- Incremento em y - Esta variável define o incremento que será realizado na direcção do comprimento do Hélice sempre que é realizado um percurso completo da sonda no sentido da largura do hélice, Figura 4.19.

Sistema de inspecção de Jantes:

- Incremento em y2 – esta variável define a rotação que é realizada pela sonda CI na inspecção do furo;
- Incremento em x2 – esta variável define o valor do incremento que é realizado no sentido da profundidade do furo em cada rotação que a sonda realiza.

A opção pela inspecção automática do Hélice ou da Jante é feita com o recurso a um “Radio Boton”. Existe um botão de activação da inspecção automática, sendo que esta só é realizada se o botão “Play” estiver activo.

O percurso realizado pela sonda de inspecção, tanto no caso do Hélice como da Jante, é registado no gráfico a branco (canto superior esquerdo do Layout). Esta ferramenta é útil pois permite o registo dos pontos percorridos pela sonda bem como a futura identificação das regiões onde sejam detectados defeitos nos componentes. Isto permitirá que se realize uma base de dados com a informação de inspecção dos componentes para futura consulta, como já acontece com outras técnicas END como o RX.

## **4.6 - Hélice padrão para validação do sistema**

No hélice escolhido para realizar a validação do sistema, foram realizados defeitos padrão por electro erosão, cuja morfologia é semelhante à encontrada nos defeitos por fadiga que surgem em serviço nos hélices (Anexo 1.7).

Foram realizados três defeitos de 0,25 mm de largura com profundidades de 0,1 mm, 0,2 mm e 0,5 mm, e três defeitos com 0,5 mm de largura com as mesmas profundidades, Figura 4.20. A direcção dos defeitos está alinhada com o sentido do comprimento do hélice.

O objectivo deste hélice padrão é determinar a capacidade que o sistema tem em detectar os defeitos. Sabendo a dimensão do defeito que é percorrido pela sonda, é possível comparar o desempenho do sistema automatizado com a inspecção manual do mesmo. Este estudo será fundamental para a determinação das potencialidades reais do protótipo.

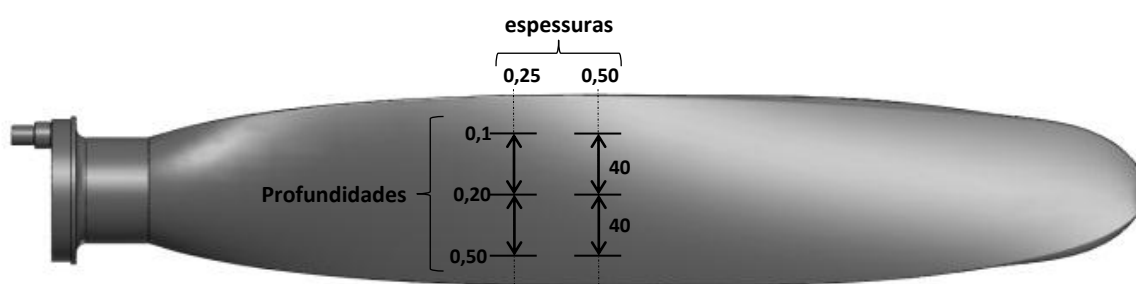


Figura 4.20 - Representação dos defeitos padrão feitos por electro erosão (dimensões em mm).

Recorre-se ainda a um padrão de defeitos Olympus para a validade da potencialidade do sistema, bem como a comparação e confronto do desempenho da inspecção manual com a automática (Figura 4.21 e Anexo 1.8).



Figura 4.21 - Representação do padrão de defeitos Olympus ( medidas da profundidade dos defeitos em mm).



## **5 - Ensaios experimentais**

### **5.1 - Introdução**

O sistema de inspeção desenvolvido foi aplicado na inspeção de um hélice na empresa Aerohélice. Os resultados obtidos nos testes aplicados são abordados no presente capítulo.

No ponto 5.2 descrevem-se os Ensaios Não Destrutivos realizados para validação do sistema automatizado de inspeção bem como os resultados obtidos. Os parâmetros analisados são a precisão, a repetibilidade do sinal e a velocidade da inspeção.

Por fim, no ponto 5.3 analisam-se os resultados obtidos na inspeção automática do hélice, confrontados com os obtidos na inspeção manual, fazendo-se posteriormente um balanço final à operacionalidade do sistema.

### **5.2 - Realização dos Ensaios Não Destrutivos**

Na realização dos ensaios não destrutivos por CI, apresentam-se os resultados obtidos na inspeção manual assim como os obtidos na inspeção automatizada realizada pelo protótipo, com recurso a um aparelho Nortec 500D (Anexo 1.9) [45]. A frequência da inspeção foi de 200 KHz, o ângulo foi de 91°, com um ganho horizontal de 62,2dB e um ganho vertical de 70dB. Estes parâmetros foram aplicados em todos os ensaios realizados.



### 5.2.1 - Precisão da Inspeção

Nos ensaios realizados neste ponto, pretende-se perceber qual a precisão obtida pela inspeção automática realizada pelo protótipo desenvolvido. Uma das questões importantes para garantir uma elevada precisão da inspeção e consequentemente uma boa dimensionalização dos possíveis defeitos a detectar é a estabilidade do dot. A instabilidade verificada no dot quando se inspeciona uma superfície deve-se às oscilações do seu contacto com a sonda, semelhantes ao que sucede com o fenómeno de lift-off. A ocorrência desta variação no sinal resulta numa difícil interpretação do defeito obtido. Os ensaios realizados para análise deste parâmetro consistiram na inspeção de uma superfície com 3 defeitos padrão sucessivos e de diferentes dimensões.

Na Figura 5.1 apresentam-se os gráficos relativos à inspeção do padrão de defeitos descrito na Figura 4.21. Na Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam-se os gráficos relativos à inspeção dos defeitos realizados no hélice-padrão, descritos na Figura 4.20.

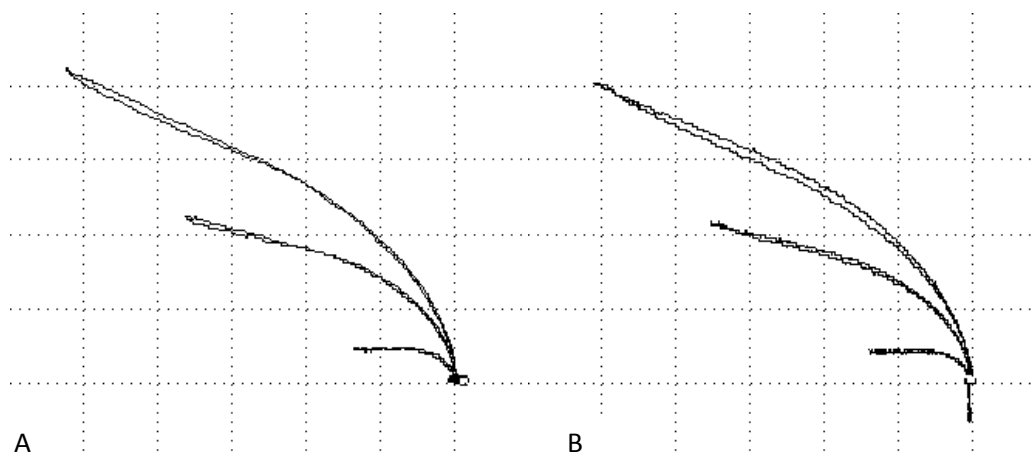


Figura 5.1 - Inspeção por CI do padrão de defeitos. Defeitos do padrão Olympus: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

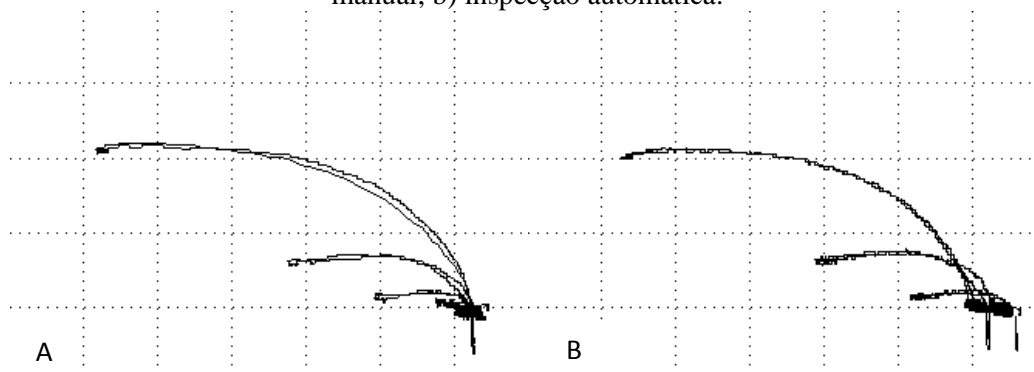


Figura 5.2 - Inspeção dos defeitos de 0,25mm de largura no hélice: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

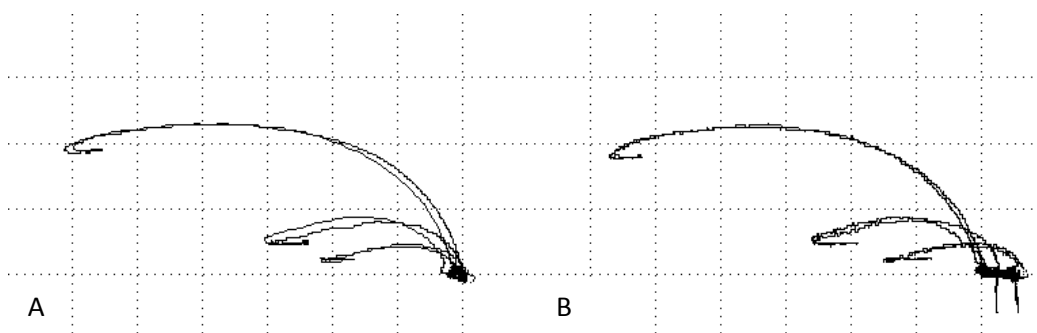


Figura 5.3 - Inspeção dos defeitos de 0,5mm de largura no hélice: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

### 5.2.2 - Repetibilidade da Inspeção

Neste ponto analisa-se a capacidade que a inspeção END por CI tem de replicar os seus resultados em diferentes ensaios dos mesmos defeitos. O ensaio consistiu em inspeccionar 10 vezes o mesmo defeito sucessivamente, obtendo um sinal sobreposto das várias passagens. Este procedimento foi realizado quer manualmente quer automaticamente para o defeito-padrão de 0,04 mm de profundidade (Figura 5.4), e para os defeitos-padrão do hélice de 0,25mm de largura com 0,5mm de profundidade (Figura 5.5) e 0,5mm de largura com 0,5mm de profundidade (Figura 5.6).

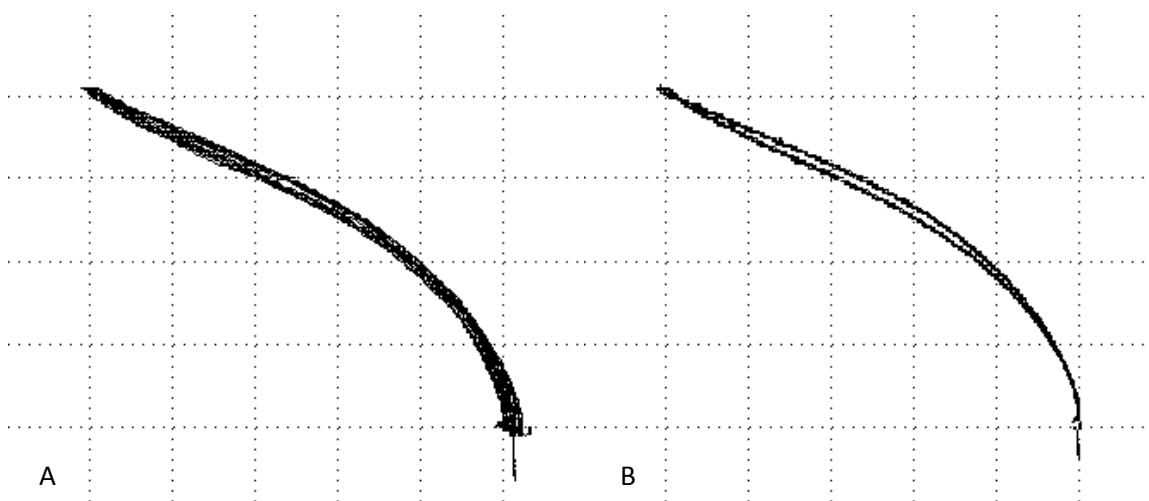


Figura 5.4 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,04mm de profundidade: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

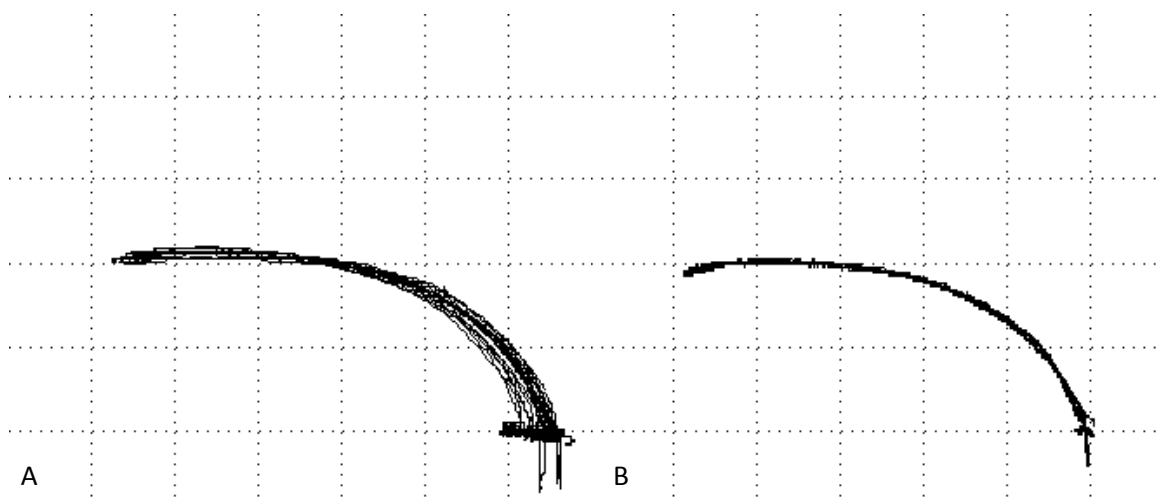


Figura 5.5 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,5 mm de profundidade e 0,25 mm de largura: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

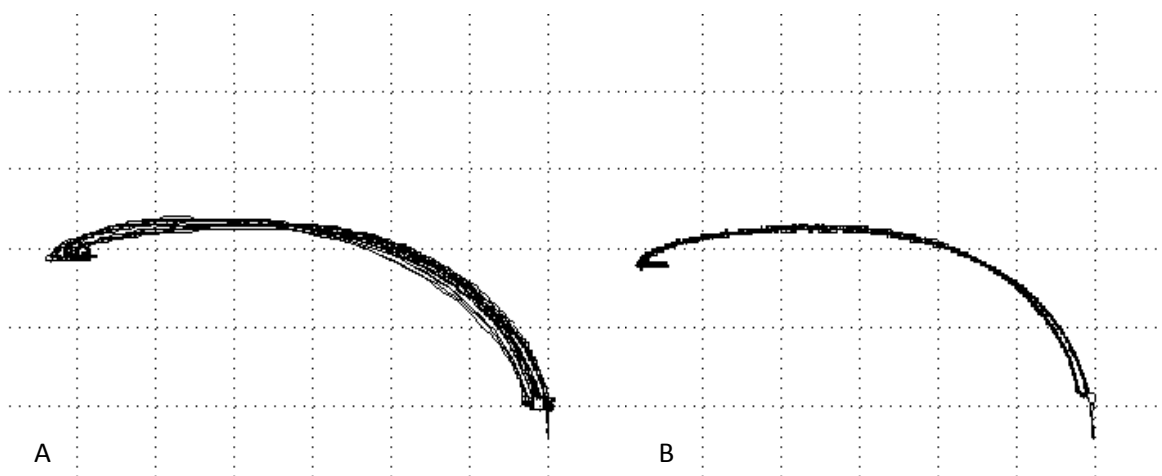


Figura 5.6 - Repetibilidade do ensaio para o método manual e automático (10 vezes) na presença de um defeito-padrão de 0,5mm de profundidade e 0,5mm de largura: a) inspeção manual; b) inspeção automática.

### 5.2.3 - Análise individual de defeitos

Realizou-se a inspeção individual manual e automática dos defeitos do padrão Olympus (Figura 5.7) e dos defeitos realizados por electro erosão no Hélice. Estes resultados serão utilizados posteriormente para análise dos restantes ensaios realizados (de precisão e repetibilidade).

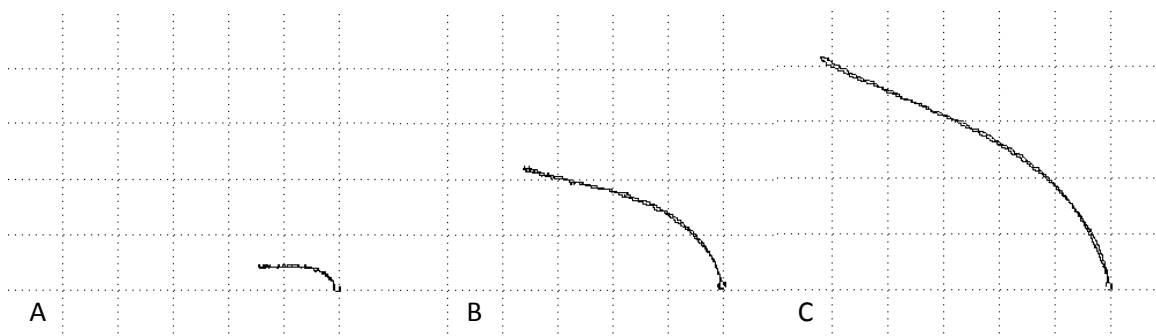


Figura 5.7 - Representação gráfica da inspeção individual dos defeitos do padrão Olympus com o sistema automático.

#### 5.2.4 - Lift Off

O Lift-off é um fenómeno que se origina quando o contacto da sonda CI com o material a inspecionar é parcial ou totalmente interrompido, originando um sinal de impedância no aparelho que pode afectar a detecção dos possíveis defeitos.

Para garantir que os sinais obtidos pelo efeito lift-off se distinguem dos possíveis defeitos do material, o parâmetro do ângulo é definido para um valor que coloque a linha do lift-off horizontal. Uma vez que os defeitos originam tipicamente um sinal como o que se representa na Figura 5.8, não existe a possibilidade de confundir os dois sinais.

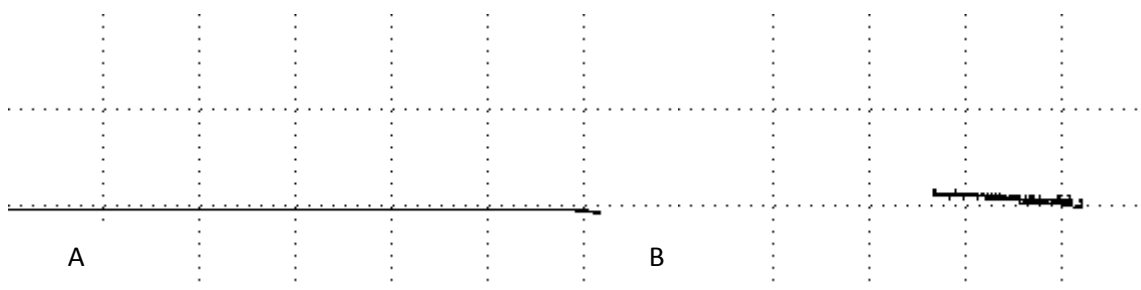


Figura 5.8 - Representação gráfica do efeito do lift-off no sinal de CI: a) lift-off planar; b) lift-off angular.

#### 5.2.5 - Velocidade da Inspeção

A inspeção do hélice Hartzell por CI, de acordo com o manual do fabricante, deve ser realizada percorrendo a sonda no sentido do comprimento e da largura do componente como representado na Figura 4.19. A inspeção no sentido da largura teve uma duração de 55 minutos. O tempo obtido

esteve limitado à velocidade da calha que realiza o movimento transversal (calha de fuso), a qual possui uma relação avanço por volta do motor desfavorável a velocidades altas (ver tabela 1). Este problema poderá ser corrigido com o recurso a uma calha de correia que possua uma relação mais favorável à aplicação, como a que já é aplicada no sentido longitudinal do hélice, que permite velocidades superiores.

Tendo em conta a velocidade obtida pela calha de correia, que é 20 vezes superior à da calha de fuso, concluiu-se que a velocidade da inspeção automática no sentido da largura do hélice reduz-se para um valor inferior a 5 minutos, mediante a realização da alteração referida.

### **5.3 Sonda IOnic**

A sonda IOnic é composta por uma bobina de excitação toroidal, e uma bobina sensível espiral plana perpendicular à primeira e paralela à superfície de inspeção.

Os desenvolvimentos incidiram na configuração e integração da sonda IOnic no sistema de inspeção automático do hélice e na aplicação de novas variantes das sondas e dos respectivos dispositivos de geração de sinal.

Uma vez que o dispositivo de geração de sinal da sonda é complexo, possuindo uma sonda de excitação e uma de recepção do sinal, torna-se complicado fazer a integração deste na Crio 9074, pelo que se recorreu a duas ferramentas em Labview independentes. O movimento dos motores foi dado pelos módulos NI 9501 da Crio e a recepção do sinal da IOnic Probe feito pelo dispositivo de geração de sinal concebido para o efeito (Figura 5.9 – b).



Figura 5.9 – Inspeção automática do hélice com a sonda Ionic: a) vista geral; b) gerador de sinais da sonda; c) Marcação dos 30 ensaios realizados; d) posicionamento da sonda na inspeção.

A sonda utilizada nos ensaios designa-se AB4, e possui um filamento de excitação e duas bobinas sensíveis. O diâmetro da sonda é de 4 mm.e as bobinas sensíveis têm 2 filamentos com espessura e afastamento de 100  $\mu\text{m}$ . O seu filamento de excitação é unitário, com um comprimento de 5 mm e um espessura de 0,5 mm. A Corrente de excitação do filamento para ambos os ensaios foi de 1 A.

Realizou-se um primeiro ensaio da superfície representada na Figura 5.9 - c), que possui os 6 defeitos padrão descritos na Figura 4.20. O ensaio consistiu em 30 varrimentos da superfície referida, espaçados de 5mm entre si, como representado na Figura 5.10, com a sonda Ionic configurada para uma frequência de 5000 KHz.

Verificou-se neste primeiro ensaio que ocorria a saturação do sinal obtido pela sonda nos defeitos de 0,5 mm de largura, devido à elevada frequência utilizada.

Posteriormente, procedeu-se à realização de um segundo ensaio com as mesmas condições utilizadas no primeiro ensaio, tendo-se apenas alterado a configuração da sonda para uma frequência mais baixa, de 500 KHz (Tabela 2).

No segundo ensaio realizado obteve-se uma boa detecção dos 6 defeitos padrão, tendo-se realizado o C-Scan apresentado na Figura 5.11.

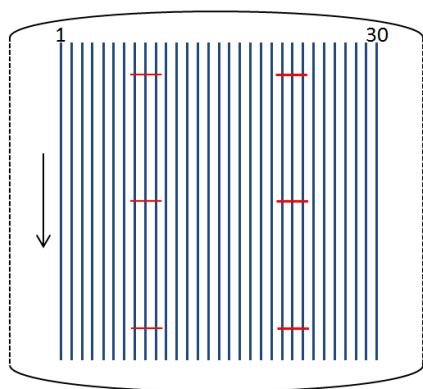


Figura 5.10 – Representação do método de inspeção utilizado nos ensaios realizados com a sonda IOnic.

Tabela 2 – Parâmetros dos ensaios realizados com a sonda IOnic.

Ensaio	Frequência (KHz)	Aquisições	Varrimentos	Espaçamento entre varrimentos (mm)
1	5000	600	30	5
2	500	600	30	5

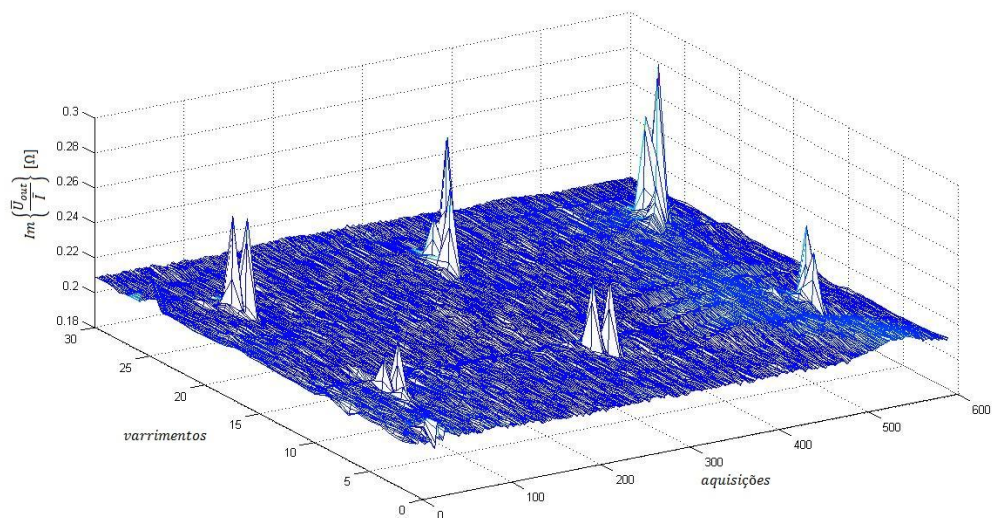


Figura 5.11 – Gráfico do C-Scan da inspeção do hélice com a sonda IOnic para uma frequência de 500 KHz.

## 5.4 - Análise de Resultados

### 5.4.1 - Precisão da Inspeção

Na inspeção contínua de 3 defeitos sucessivos de diferentes dimensões, realizados em padrão de defeitos e nos defeitos realizados por electroerosão no hélice, verificou-se que na inspeção automática se obtém maior estabilidade do dot do que na inspeção manual, Figura 5.12.

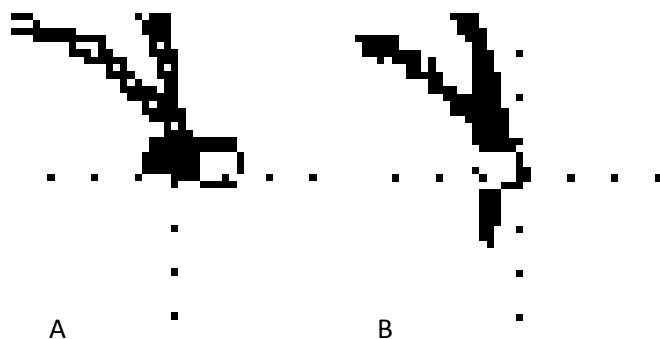


Figura 5.12 - Representação gráfica do pormenor do dot na inspeção dos 3 defeitos do padrão Olympus: a) manual; b) automático.

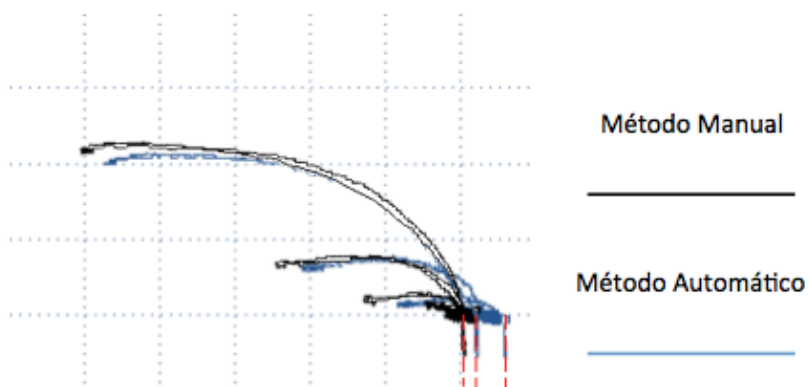


Figura 5.13 - Sinal CI da inspeção contínua de 3 defeitos sucessivos nos defeitos de 0,25 mm de largura no hélice.



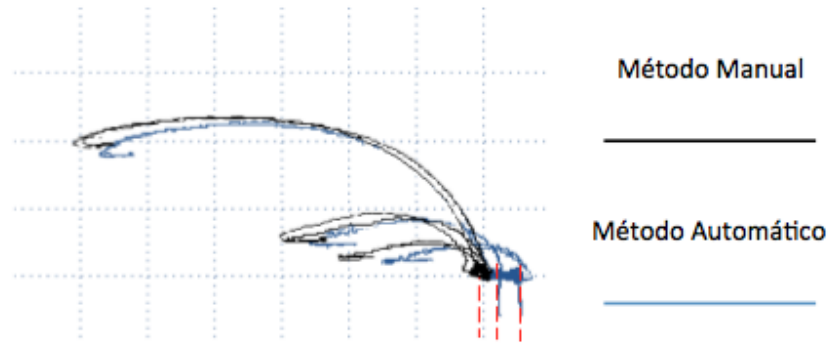


Figura 5.14 - Sinal CI da inspeção contínua de 3 defeitos sucessivos nos defeitos de 0,5 mm de largura no hélice.

Nas inspeções realizadas no hélice padrão verificou-se que o sinal obtido na inspeção automática possui uma grande oscilação do dot devido à ocorrência de lift-off ao longo do percurso da sonda sobre a superfície do material, Figura 5.13 e Figura 5.14. Isto deve-se ao formato do perfil alar, e à inexistência de um ajuste fino da sonda com o mesmo. Este problema pode ser resolvido recorrendo a um suporte para a sonda que ajuste a sua posição ao longo da inspeção.

A solução construtiva que permite resolver este problema é apresentada posteriormente em “Suporte para Sonda de Superfícies”.

## 5.4.2 - Repetibilidade da Inspeção

Analisando os resultados obtidos para a inspeção do defeito padrão em 10 passagens sucessivas verificou-se que no modo manual se obtêm curvas de impedância que, apesar de se encontrarem próximas umas das outras, não se sobrepõem, o que significa que o sinal obtido pela sonda pode variar de acordo com factores que são difíceis de controlar pelo técnico. No caso da mesma inspeção realizada pelo sistema automático verificou-se que existe uma sobreposição quase completa dos sinais obtidos nas 10 passagens. A diferença verificada entre os gráficos obtidos na inspeção manual e na inspeção automática deve-se fundamentalmente ao facto do técnico de inspeção não conseguir assegurar que o ângulo entre a superfície do material e a sonda se mantenha constante em todas as passagens realizadas, o que provoca variações no sinal obtido pela sonda CI. No caso da inspeção automática garante-se que a sonda se mantém sempre na mesma posição pelo que o sinal obtido pela sonda é sensivelmente o mesmo em todas as passagens. Na Figura 5.15 são apresentados os gráficos obtidos nos dois ensaios de repetibilidade realizados no

padrão de defeitos Olympus, bem como a sobreposição dos mesmos. São ainda apresentadas as sobreposições dos ensaios de repetibilidade realizados nos defeitos padrão do hélice.

Pela análise das sobreposições verifica-se que o sinal da sonda CI obtido na inspeção automática é mais definido, com uma área de cobertura do sinal menor que o obtido na inspeção manual, o que permite uma dimensionalização mais precisa do defeito em causa.

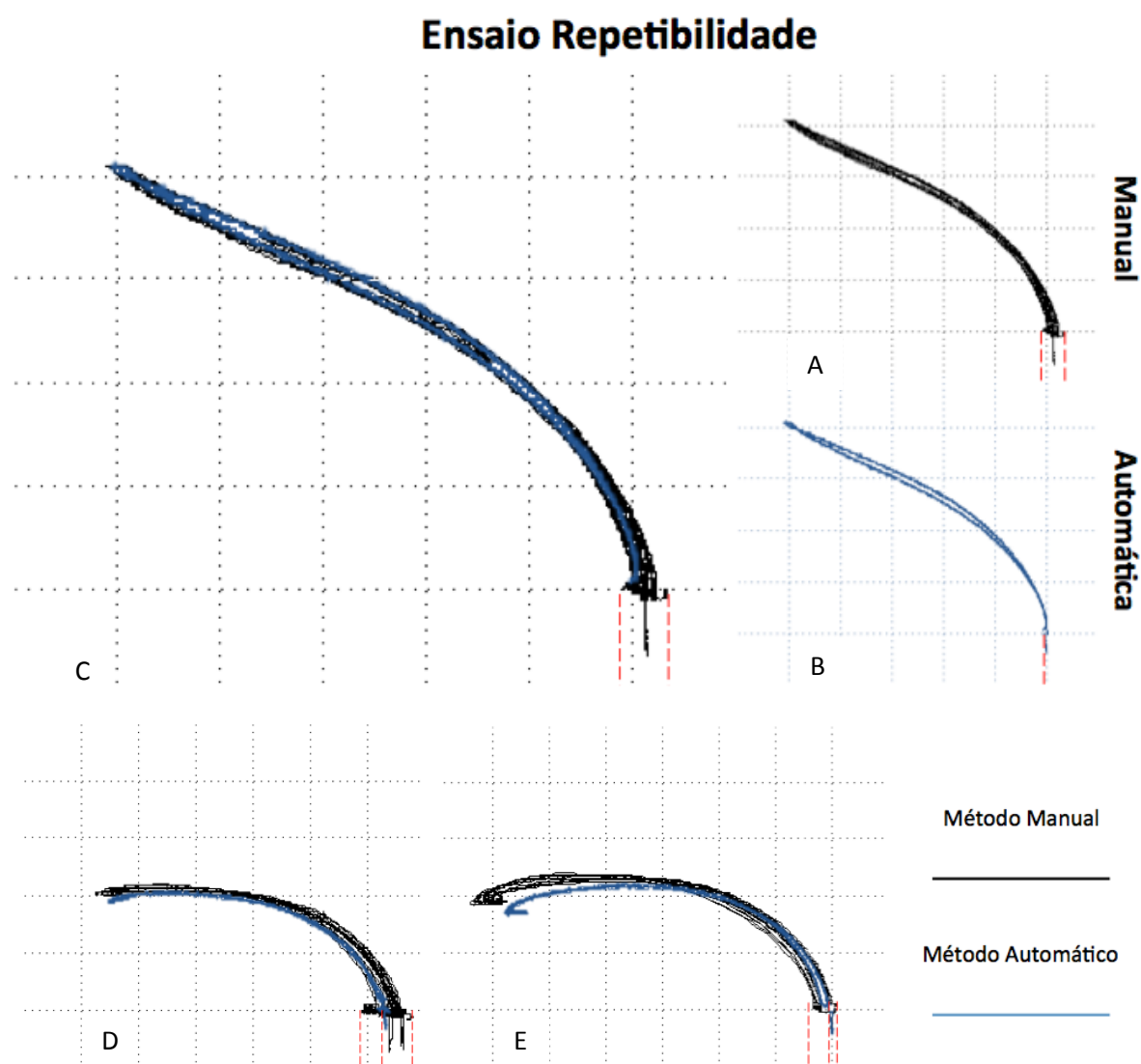


Figura 5.15 - Representação dos gráficos obtidos nos ensaios de repetibilidade (10 vezes): a) defeito padrão 0,04 mm – inspeção manual; b) defeito padrão 0,04 mm – inspeção automática; c) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito padrão 0,04 mm; d) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito do hélice de 0,25 mm de espessura com 0,5 mm de profundidade; e) sobreposição do ensaio manual com o automático – defeito do hélice de 0,25 mm de espessura com 0,5 mm de profundidade.

### 5.4.3 - Análise individual de defeitos

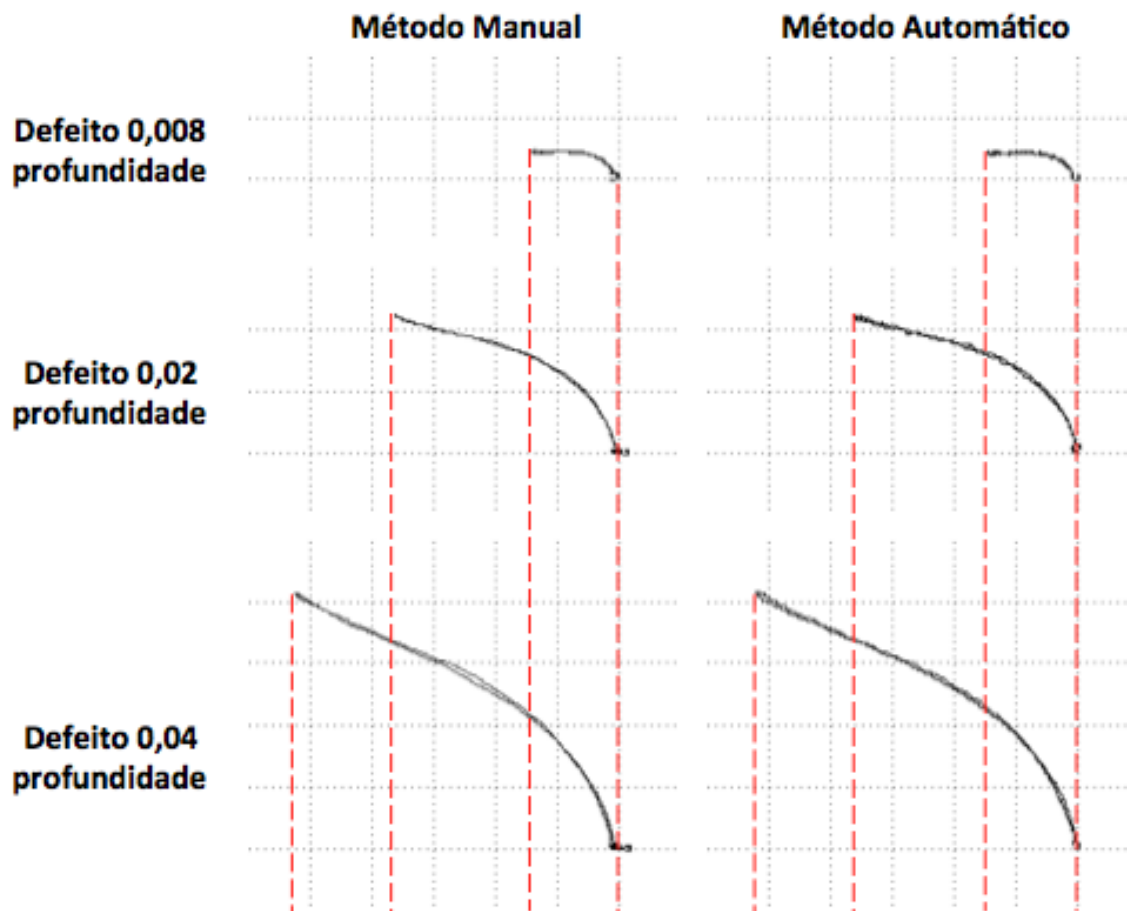


Figura 5.16 - Gráficos da inspeção individual dos defeitos do padrão Olympus.

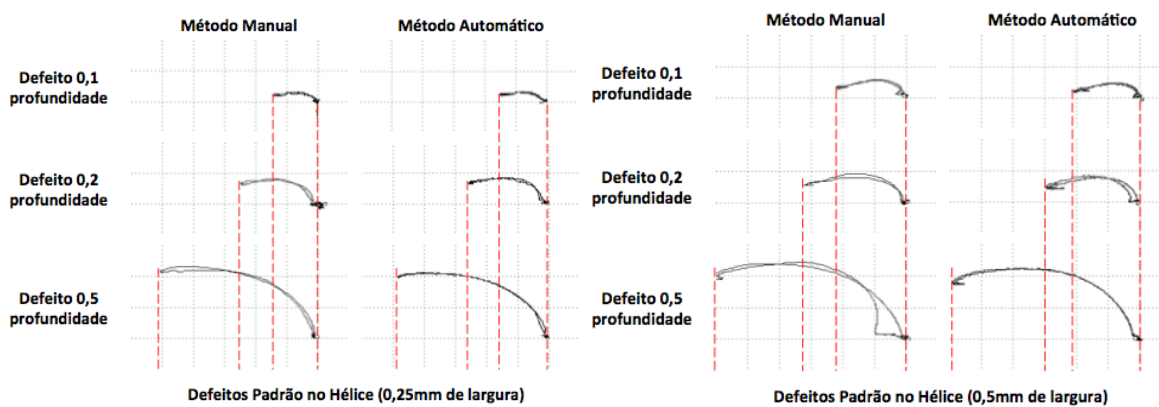


Figura 5.17 - Gráficos da inspeção individual dos defeitos do Hélice.

Pela análise dos gráficos obtidos através da inspeção individual de cada defeito padrão, é possível retirar algumas conclusões e reforçar ainda a análise feita para os ensaios de precisão e repetibilidade. Como é possível verificar, a estabilidade obtida pelo dot na inspeção manual em alguns dos gráficos (Figura 5.16 e Figura 5.17 - defeitos com 0,2 mm profundidade) é mais acentuada que o verificado para a inspeção automática. Este fenómeno vem reforçar a análise realizada para a precisão da inspeção, na qual se confrontaram inspeções manuais e automáticas de 3 defeitos consecutivos. O que se conclui é que tal fenómeno também se verifica para a inspeção de um só defeito, o que confirma a criticidade da instabilidade do dot para a dimensionalização de defeitos e consequente detecção dos mesmos.

Nos gráficos da Figura 5.17 - defeitos com 0,5 mm de profundidade verifica-se que o sinal obtido pela inspeção manual destes defeitos do hélice possuem maior instabilidade que o verificado no gráfico da inspeção automática dos mesmos defeitos. Como foi analisado para a repetibilidade da inspeção, o sinal obtido para a inspeção manual possui algumas oscilações devido fundamentalmente à dificuldade que o técnico que realiza a inspeção tem em manter a perpendicularidade da sonda com a superfície a inspecionar. Este facto origina instabilidade no sinal obtido pelo equipamento CI que é perceptível na inspeção de apenas um defeito. Verifica-se que o sinal obtido na inspeção automática dos mesmos defeitos é mais estável.

#### 5.4.5 - Suporte para Sonda de Superfícies

Para corrigir o problema detectado na inspeção da superfície, em que sucedeu um fenómeno de deslocamento do dot, devido à geometria do perfil alar, desenvolveu-se um suporte que mantém constante a distância entre a sonda e a superfície do hélice com o recurso a um rolamento linear e a um batente na sua superfície, Figura 5.18.

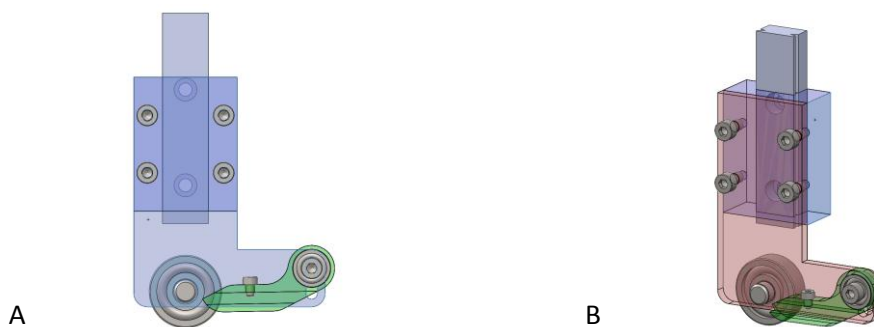


Figura 5.18 - Modelação em Solidworks 2010 do suporte da sonda de superfícies: a) vista de frente; b) vista isométrica.

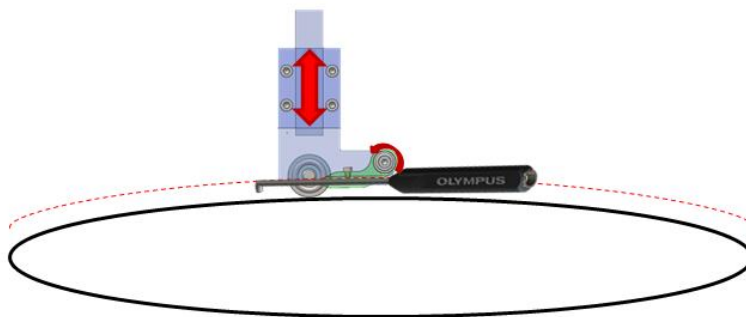


Figura 5.19 – Representação do funcionamento do suporte para a sonda de superficies projectado.

O suporte projectado é composto por um rolamento linear no qual se encontra acoplada a sonda de superficies (Figura 5.19). A distância da sonda à superfície do hélice é constante, o que é garantido por um rolamento que faz de batente e que regula a posição do suporte.

## **Conclusões e desenvolvimentos futuros**

### **Conclusões**

No âmbito deste trabalho mostrou-se que o procedimento actual de Ensaaios Não Destrutivos dos hélices revela-se bastante demorado, apresentando demasiadas tarefas manuais e elevados custos.

Foram desenvolvidos e projectados sistemas dedicados de END adaptados à especificidade do problema concreto no âmbito da actividade da Aerohélice, Lda. O protótipo final de inspecção automatizada de hélices desenvolvido apresenta potencial para melhorar a inspecção não destrutiva dos hélices, tendo-se verificado que:

- O sistema automatizado permite a realização da inspecção dos hélices, cumprindo rigorosamente as indicações dadas pelo fabricante, o que é difícil de garantir na inspecção manual;
- O sistema mecânico de alinhamento do hélice desenvolvido demonstrou ser funcional, tendo cumprido todos os requisitos necessários para garantir a perpendicularidade da sonda com a superfície do hélice;
- O sistema de controlo do sistema, bem como o software desenvolvido confere ao protótipo elevada versatilidade, permitindo a inspecção de hélices em diversas condições, com um baixo custo;
- aumenta significativamente a repetibilidade da inspecção;
- O sistema tem potencial para reduzir significativamente os tempos de inspecção dos hélices;

- É possível aplicar o conceito a outros modelos de hélices de maiores dimensões, por ajuste das cotas de atravancamento da estrutura;
- Possibilita fazer o registo dos dados de inspecção, para documentação e análises futuras;
- O operador pode dedicar-se exclusivamente à análise do registo efectuado pela sonda, contribuindo para a melhoria da fiabilidade da inspecção realizada;
- a utilização da sonda IOnic, devido à sua elevada sensibilidade, tem potencial para aumentar a fiabilidade da inspecção dos hélices.

Considera-se assim que o protótipo desenvolvido e validado experimentalmente tem potencial para aumentar a velocidade e a fiabilidade da inspecção, dando melhores garantias e competitividade ao sector aeronáutico. Esta apreciação favorável foi também transmitida pelos técnicos da empresa Aerohélice.

Este trabalho constitui um exemplo bem sucedido de cooperação entre empresas, Universidades e Centros de Investigação. Os resultados do mesmo deram já origem a diversas comunicações científicas [46 - 48], estando outras previstas.

## **Propostas para desenvolvimentos futuros**

Como desenvolvimentos futuros deste projecto, considera-se que é de grande interesse a aplicação industrial do protótipo na empresa Aerohélice para realização de inspecção real.

Considera-se que poderá realizar-se o melhoramento do software em *Labview* de controlo dos motores passo-a-passo e de recepção dos sinais da sonda CI, e consequentemente melhorar o seu desempenho.

O desenvolvimento de um sistema de detecção automática dos defeitos, através da detecção do sinal analógico emitido pela sonda permitirá futuramente, reduzir a necessidade do processo de inspecção ser totalmente executado por um técnico certificado.

A potencialidade que o sistema tem para a aplicação de técnicas de END inovadoras, permite a futura aplicação destas e o seu teste aos hélices aeronáuticos. O sector aeronáutico é muito conservador, pelo que é de grande interesse a validação de novas técnicas END que ainda não

são utilizadas em inspecção real pela falta de garantias que deram para as aplicações específicas de que se trata nos componentes aeronáuticos.

O desenvolvimento de um sistema automatizado de inspecção do *Shank* do hélice é de grande interesse, uma vez que este procedimento é realizado manualmente e permitiria reduzir os tempos de inspecção deste componente. A opção por um sistema modular que tire partido do chassi já desenvolvido seria vantajoso para a redução dos tempos de inspecção e dos custos de desenvolvimento de um protótipo funcional.

A construção do suporte para sonda adaptável ao formato do perfil alar do hélice é de grande interesse para obtenção de um incremento da precisão do sistema na inspecção com as sondas pontuais de CI.





## Referências Bibliográficas

- [1]. Quadro de Referência Estratégico Nacional – QREN, página web, disponível em: <<http://www.qren.pt/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [2]. Aerohélice, Sociedade de Manutenção e Revisão de Hélices, página web, disponível em: <<http://www.aerohelice.com/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [3]. Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT; disponível em: <<http://www.fct.unl.pt>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [4]. Instituto de Soldadura e Qualidade – ISQ; Técnicas de CND, página web, disponível em: <<http://www.isq.pt/CND.htm>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [5]. Instituto Superior Técnico - IST; disponível em: <<http://www.ist.utl.pt>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [6]. North Atlantic Treaty Organization - NATO; NATO quality assurance requirements for design, development and production; Allied Quality Assurance Publications – AQAP, 2110, 3ª Edição - Novembro 2009; página web, disponível em: <<http://www.nato.int/docu/stanag/aqap2110/aqap2110e.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [7]. European Federation for Non-destructive Testing - EFNDT; página web, disponível em: <<http://www.efndt.org/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [8]. Instituto Nacional de Aviação Civil - INAC, página web, disponível em: <<http://www.inac.pt/vPT/Generico/Paginas/Homepage00.aspx>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [9]. North Atlantic Treaty Organization - NATO; página web, disponível em: <<http://www.nato.int>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [10]. Força Aérea Portuguesa -FAP; página web, disponível em: <<http://www.emfa.pt>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [11]. East Coast Propellers Pty Ltd, página web, disponível em: <<http://www.eastcoastpropellers.com.au/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [12]. Aerospace NDI PtyLtd, página web, disponível em: <<http://www.aerospacendi.com/Wheel.Overhauls.html>>. Acesso em Agosto de 2011;
- [13]. Magnum Aviation, página web, disponível em: <<http://magnumaviation.co.uk/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

- [14]. SOUSA, José; Desenvolvimento de um Sistema Automatizado de Ensaio Não Destrutivo para Inspeção de Componentes na Indústria Aeronáutica, Outubro de 2011, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- [15]. Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal – RELACRE. Disponível em: <<http://www.relacre.pt/>>;
- [16]. Telmo G. Santos, Luís S. Rosado, Pedro Vilaça, Moisés Piedade, Pedro M. Ramos, Investigação e Desenvolvimento de Sistemas Inovadores de END: Actuais Capacidades Instaladas em Portugal, 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – CLME’2011, Maputo, Moçambique, 29/08/2011 – 01/09/2011, ISBN: 978-972-8826-23-9, pp. 1113-1114;
- [17]. Portuguese Patent PT N.º 104089: A New NDT method based on eddy current probe variant. Date of patent: 09/06/2008. Inventors: Telmo Santos, Pedro Vilaça, Moisés Piedade. Assignee: IST; Current status: conceding;
- [18]. Portuguese Patent PT N.º 103854: New NDT eddy current probe. Data of patent: 19/10/2007. Inventors: Telmo Santos and Pedro Vilaça. Assignee: IST. Current status: conceding.
- [19]. National Instruments, página web, disponível em: <<http://www.ni.com/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [20]. Hartzell Propeller, página web disponível em: <[http://www.hartzellprop.com/product\\_applications.php](http://www.hartzellprop.com/product_applications.php)>;
- [21]. Aircraft Manuals and Pilot Supplies – ESSCO, página web, disponível em: <<http://www.esscoaircraft.com/>>. Fevereiro de 2012;
- [22]. European Aviation Safety Agency – EASA, página web, disponível em: <<http://www.easa.eu.int/index.php>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [23]. Federal Aviation Administration – FAA, página web, disponível em: <<http://www.faa.gov/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [24]. UK Civil Aviation Authority – CAA, página web, disponível em: <<http://www.caa.co.uk/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [25]. British Institute of Non-Destructive Testing – BINDT; página web, disponível em: <<http://www.bindt.org/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [26]. The International Committee for Non Destructive Testing – ICNDT, página web, disponível em: <<http://www.asnt.org/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [27]. American Society for Non-destructive Testing – ASNT, página web, disponível em: <<http://www.icndt.org/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [28]. The Chinese Society for Non-destructive Testing; página web, disponível em: <<http://www.chsndt.org/www/en/introduction.html>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

- [29]. The Japanese Society for Non-destructive Inspection - JSNDI; página web, disponível em: <<http://www.jsndi.jp/e/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [30]. SANTOS, Telmo; Fusão de dados com Lógica Fuzzy no Controlo Não Destrutivo da Soldadura por Fricção Linear, Outubro de 2006, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- [31]. Pedro Vilaça, Telmo Santos, Luísa Quintino, “Experimental Analysis, Defect Evaluation and Computational Developments of FSW”, proceedings of IIW South East – European Regional Congress, Timisoara, Romania, 2006;
- [32]. SANTOS, Telmo; Ensaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear, Julho de 2009, Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
- [33]. Basic Principles of Eddy Current Inspection, NDT Resource Center; página web, disponível em: <<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Applications>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [34]. KHAN, Md. AlahiUddin; Non-destructive Testing Applications in Commercial Aircraft Maintenance; 7th European Conference on Non-destructive Testing – ECNDT; 26-29 Maio 1998, Copenhaga; página web, disponível em: <<http://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/031/031.htm>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [35]. SILVÉRIO, Fernando; Curso de END Correntes Induzidas – Nível 1; Aerohélice, Dezembro de 1995;
- [36]. TRACY, N.; MOORE, P.; Nondestructive Testing Handbook - Liquid Penetrant Testing, Third Edition: Volume 2, The American Society for Nondestructive Testing ASNT, 1999;
- [37]. Telmo Santos, Apontamentos da disciplina de Tecnologia Mecânica IV, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011;
- [38]. LECLERC, Rémi, SAMSON, Rock; Eddy Current Array Probes for Aircraft Applications; 15<sup>th</sup> World Conference on Non-Destructive Testing; 15-21 Outubro 2000, Roma; página web, disponível em: <<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn514/idn514.htm>>. Acesso em Fevereiro de 2012;
- [39]. GÓMEZ, F.; SOLER, M.; ROLDÁN, A.; MORCILLO, G.; MARTÍNEZ, C.; RUBALCABA, J.; Métodos de ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS- Tomo II, 1998, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA quarta edição; páginas 715 a 719 e 922 a 930;
- [40]. GE Inspection Technologies - Non Destructive (NDT) Testing, página web disponível em: <[www.ge-mcs.com/en/inspection-technologies.html](http://www.ge-mcs.com/en/inspection-technologies.html)>;
- [41]. Aqualified LLC Nondestructive Testing, Inspection, Training, Auditing, examination and

Consulting – QUAKEFIED, página web, disponível em:

<<http://www.aqualified.com/index.html>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

[42]. Ruland Couplings, página web, disponível em:

<<http://www.Ruland.com/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

[43]. IGUS Plastics for longer life, página web, disponível em: <<http://www.igus.pt/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

[44]. Skf, página web, disponível em: <<http://www.skf.com/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

[45]. OLYMPUS, página web, disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/en/>>. Acesso em Fevereiro de 2012;

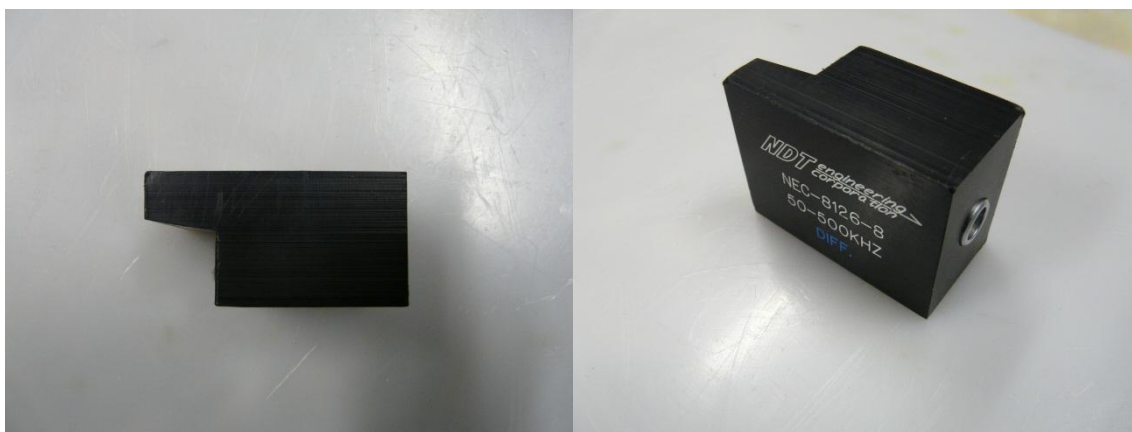
[46]. Nuno Pedrosa, Carlos Ôlo, Francisco Matos, Pedro Barros, Luísa Quintino, Telmo G. Santos, José Sousa, Pedro Vilaça, “Técnicas Avançadas de Ensaios Não Destrutivos Aplicadas a Componentes para a Indústria Aeronáutica”, 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Moçambique, Maputo, 2011;

[47]. José Sousa, Francisco Matos, Nuno Pedrosa, Telmo Santos, Pedro Vilaça, Luísa Quintino “Development of Automatic Systems for NDT Inspection of Wheels and Propeller Blades of Airplanes”, 2011;

[48]. Francisco Matos, Telmo Santos, Rosa Miranda, Luísa Quintino, Luis Pedrosa, “Desenvolvimento e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos para a Indústria Aeronáutica”, VI Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica, Portugal, Coimbra, 2012;

## Anexos

### 1.1 - Sonda de END por CI adaptada ao bordo do hélice



### 1.2 -Sondas Helicoidais Cilindricas de inspecção de superficies



### 1.3 - Aparato do procedimento de inspecção por CI



### 1.4 - Aparelhode deEND por CI da Aerohélice – Nortec 2000D e Forster-Defectometer H 2.835



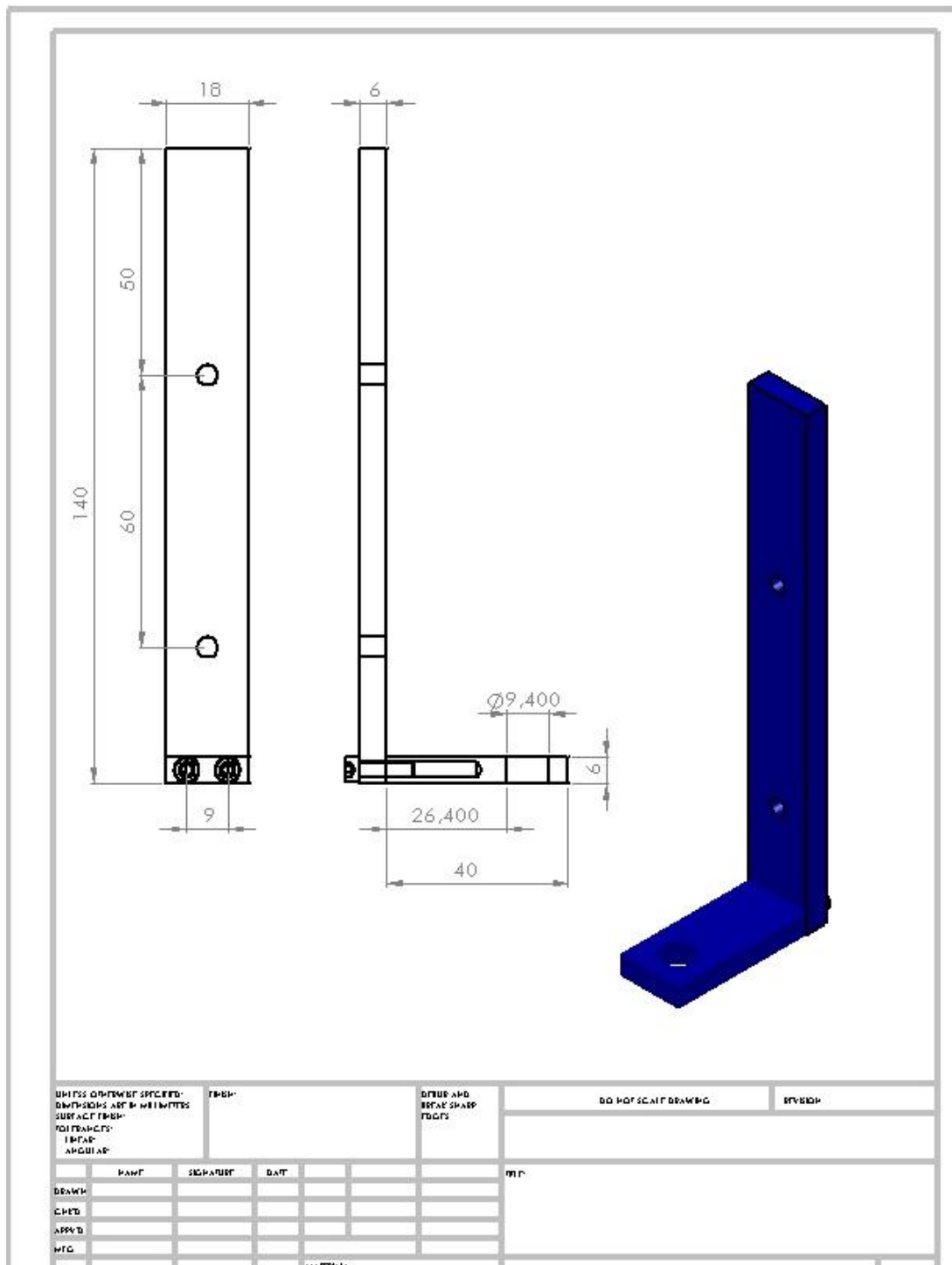
### 1.5 - Inspeção do furo de equilibragem e respectiva sonda CI



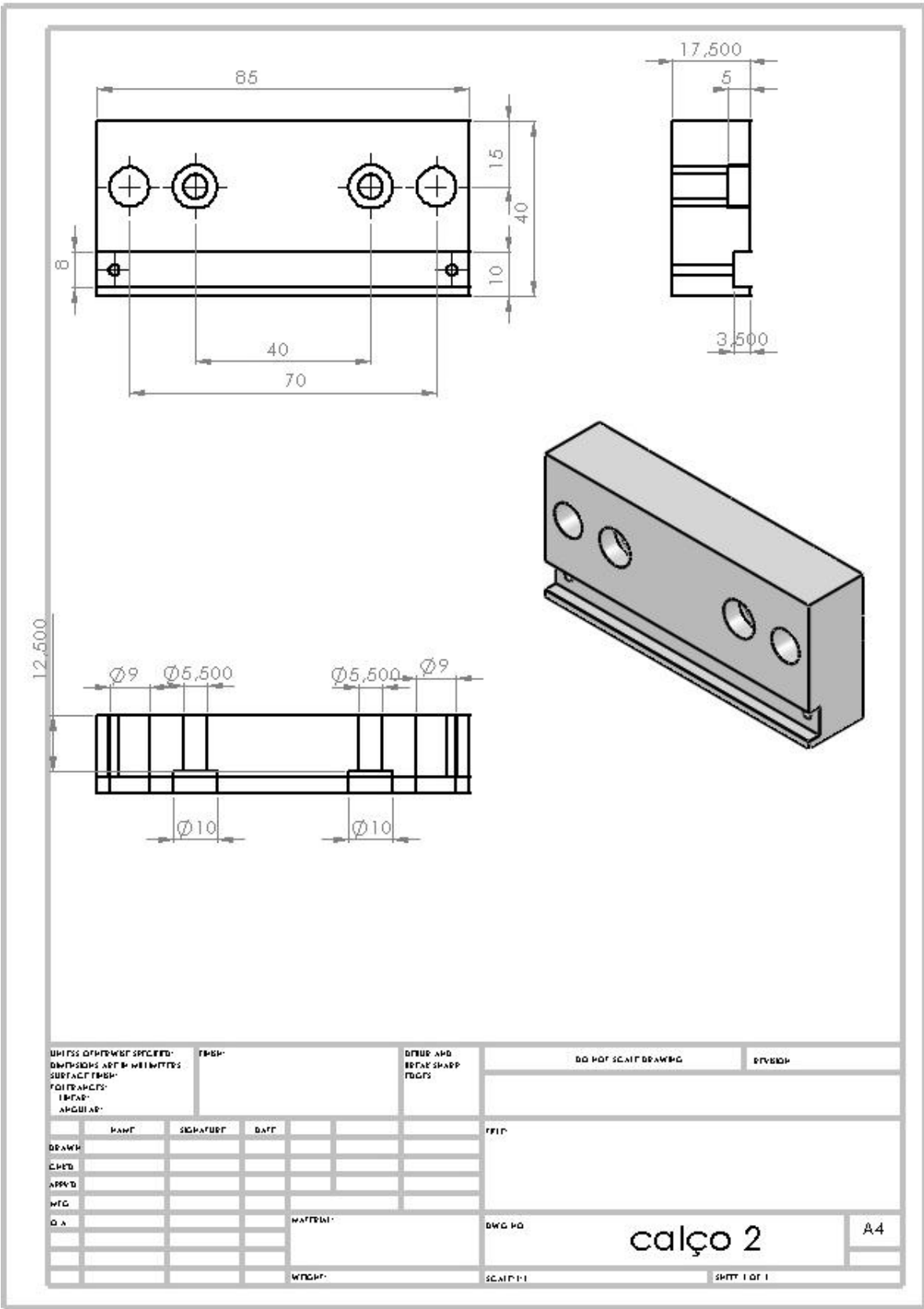


## 1.6 - Desenhos técnicos dos componentes construídos

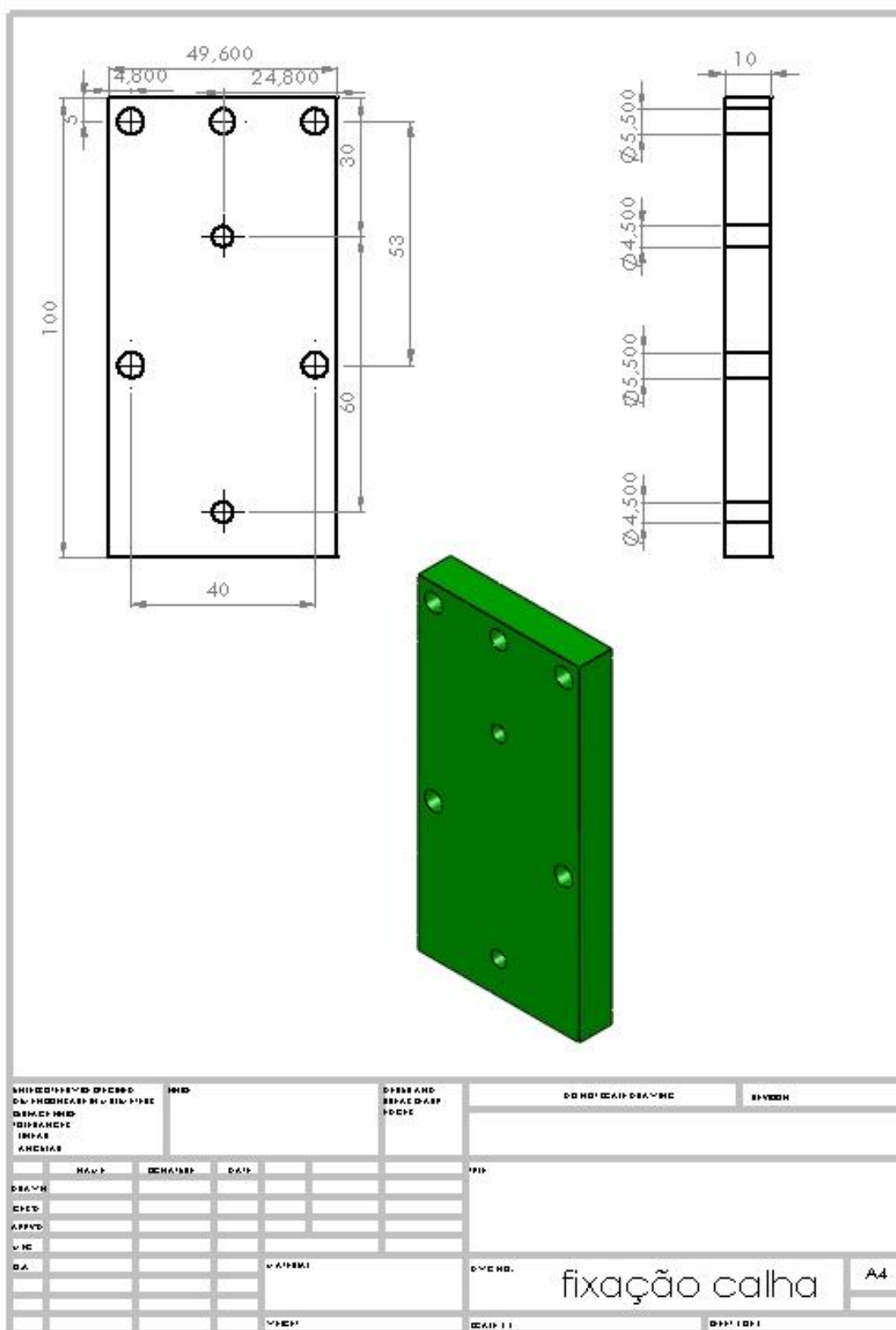
### 1.6.1 - Braço de suporte das molas verticais



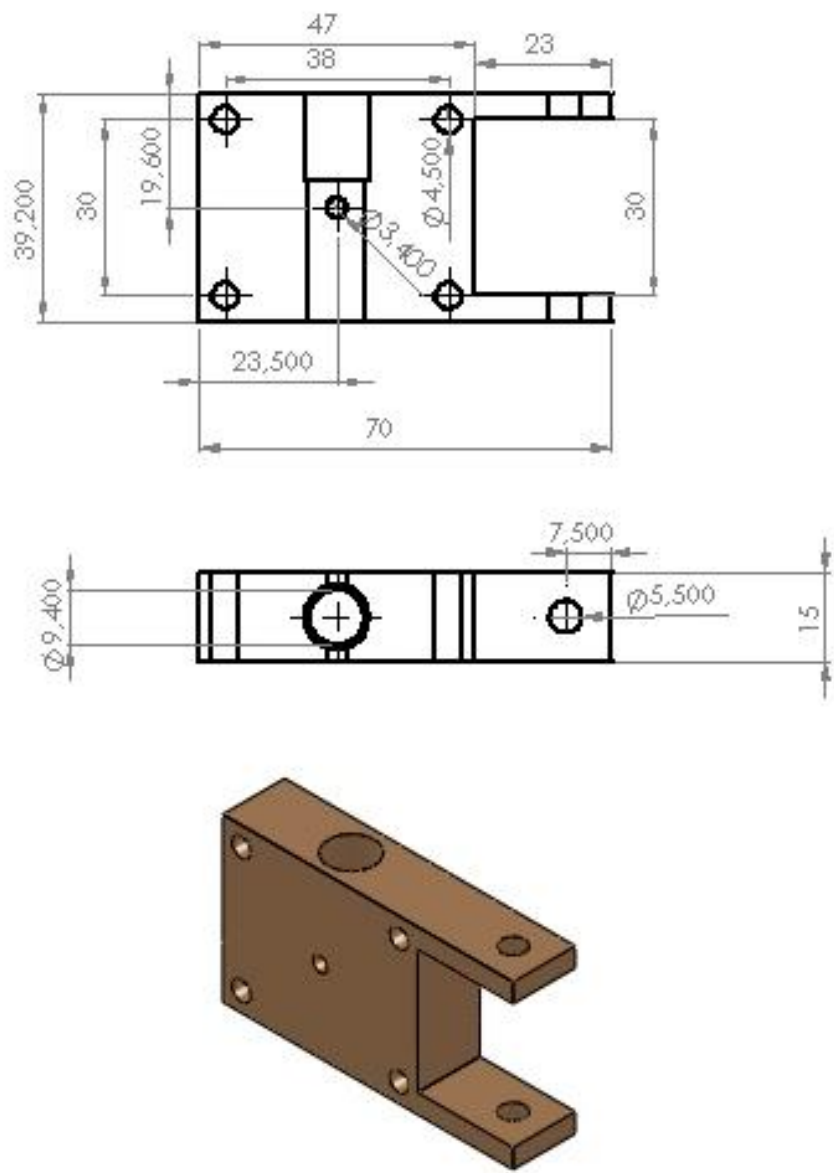
1.6.2 - Calços da fixação da calha de fuso



### 1.6.3 - Peça de ligação dos rolamentos lineares

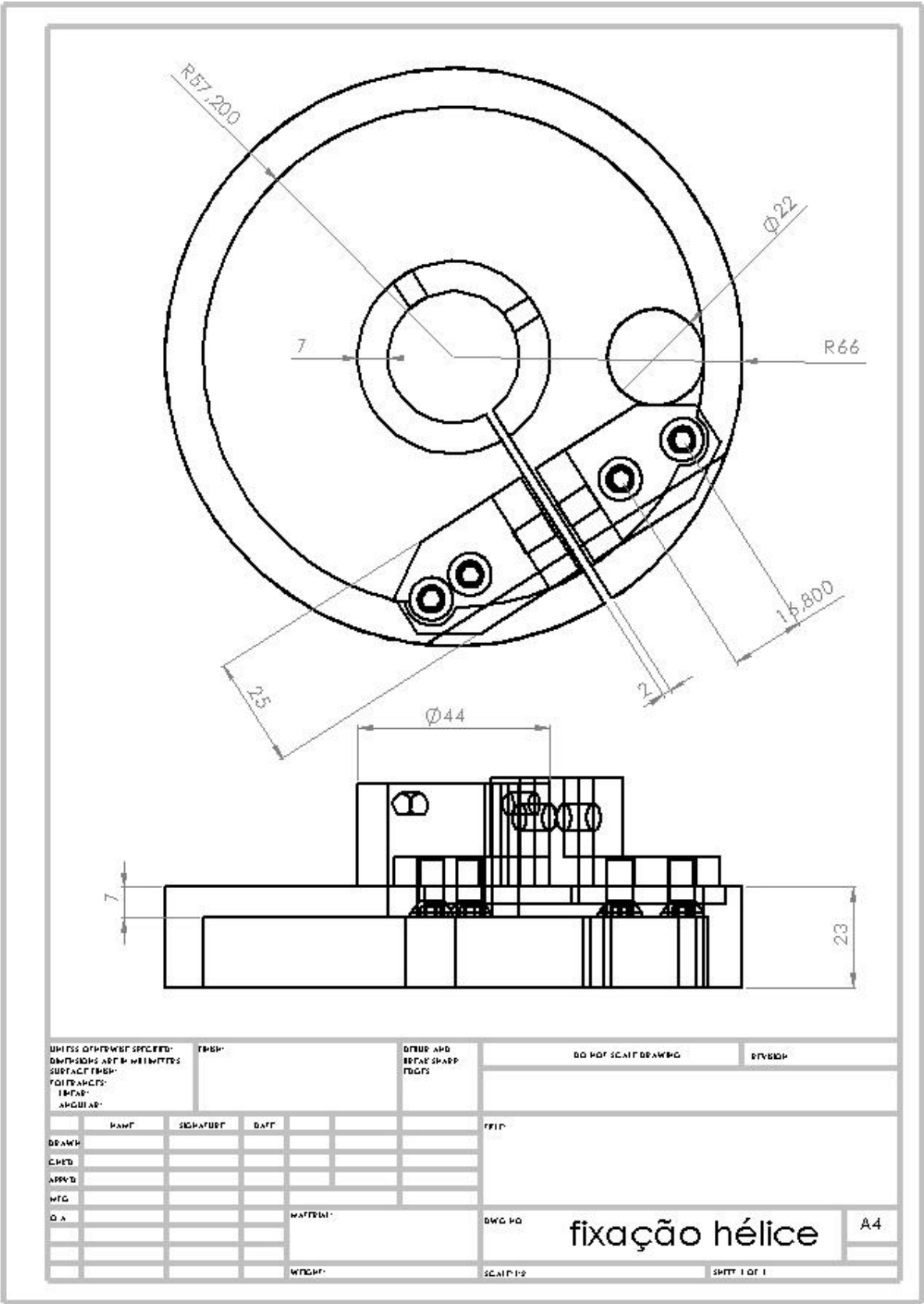


1.6.4 - Peça de acoplamento da roda de contacto

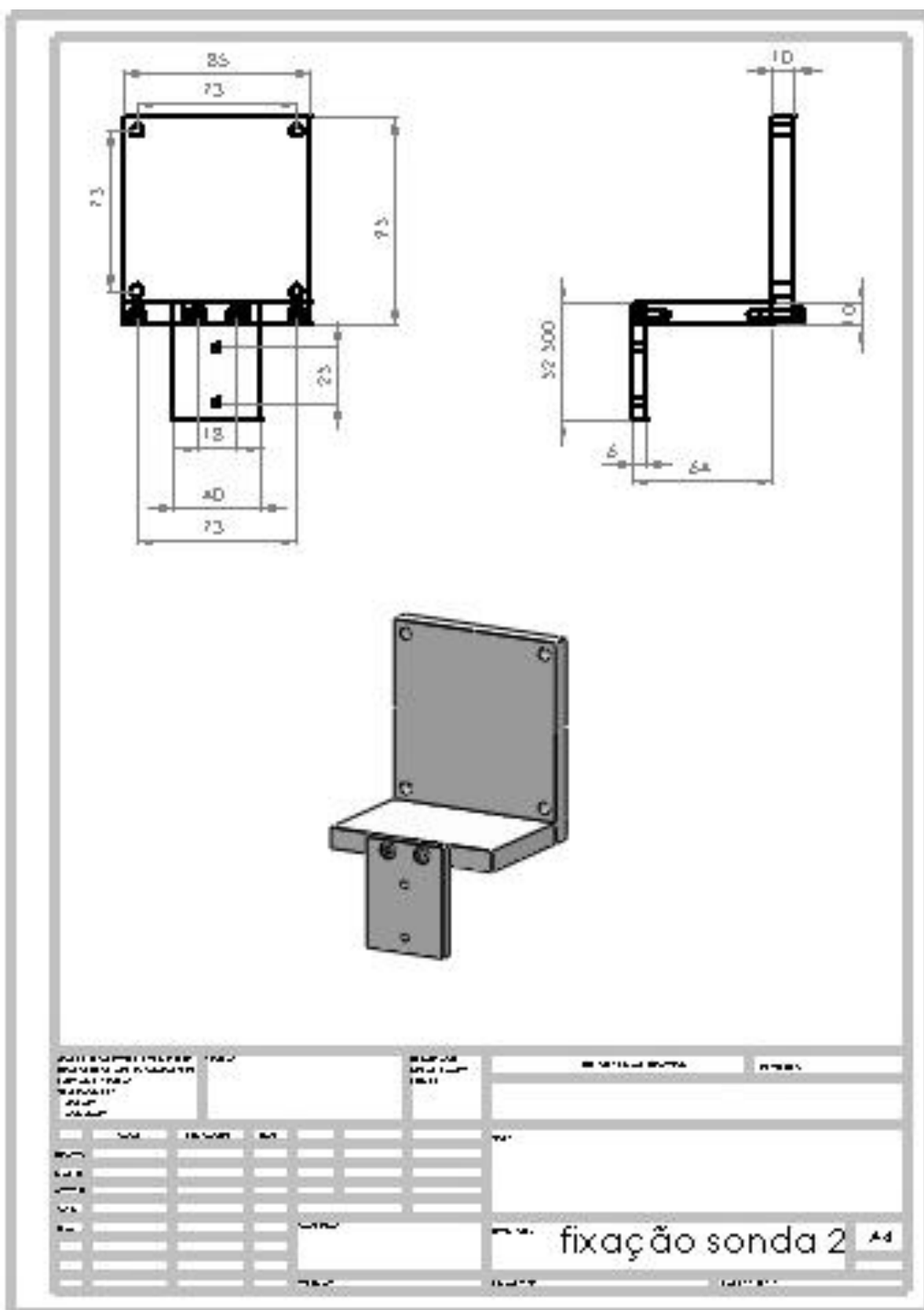


APPROVED FOR RELEASE		REVISION		DO NOT SCALE DRAWING	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	
DATE		BY		REVISION	

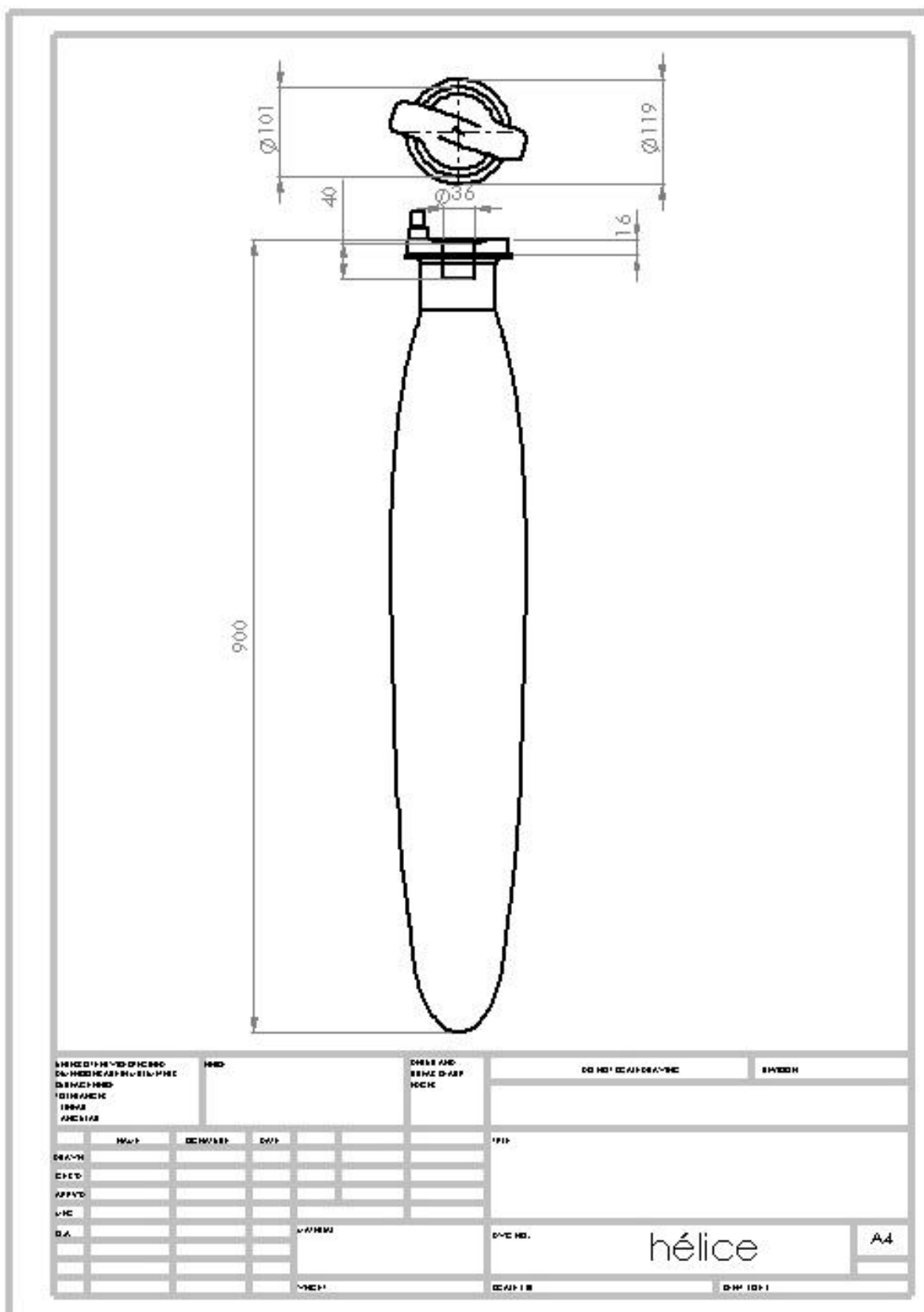
1.6.5 - Fixação do Hélice



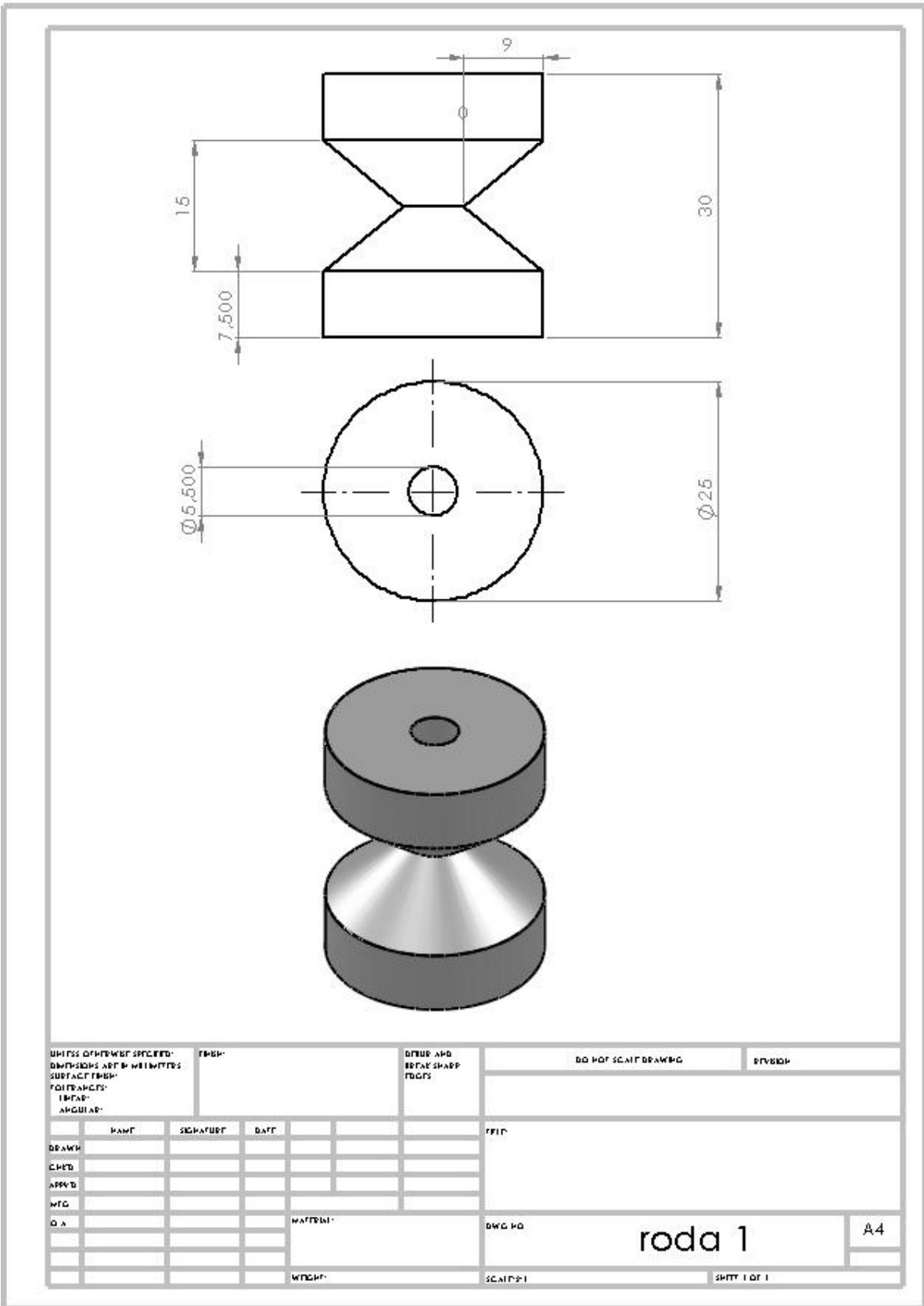
### 1.6.6 - Fixação da Sonda



### 1.6.7 - Hélice



1.6.8 - Roda de Contacto





### 1.7 - Padrão de defeitos de furos e na superfície de um hélice padrão



### 1.8 - Teste dos parâmetros de inspeção por CI num padrão de defeitos



### 1.9 - Visualização de defeitos padrão no aparelho de END por CI Nortec 500D

